

# Óbudai Egyetem

Doktori (PhD) értekezés  
tézisfüzete



**Kisméretű, merev szárnyú, pilóta nélküli légi járművek autonóm  
fedélzeti rendszereiben alkalmazott új eljárások kidolgozása és  
gyakorlati megvalósítása**

Stojcsics Dániel Zoltán

Témavezetők:

Dr. Molnár András

Prof. Dr. Szeidl László

**Alkalmazott Informatikai Doktori Iskola**

Budapest, 2012. szeptember 30.

# 1. A kutatás előzményei

A pilóta nélküli légi járművek (UAV - Unmanned Aerial Vehicles) gyakorlatilag egyidősek az ember vezette repülőeszközökkel. Természetesen a mai értelemben vett UAV minden esetben egy robotpilótával ellátott, valamilyen hasznos terhet szállító kis, közepes vagy nagy méretű repülőeszközt jelent. A kezdeti gépek csak egyszerű modellrepülőgépek voltak, de a technológia fejlődésével már a II. Világháborúban megjelentek a mechanikai stabilizátorral ellátott valódi robotrepülőgépek (repülő bombák), melyek közül a leghírhedtebb a német V1 szárnyas bomba volt. A háború utáni időszakban, az elektronikai rendszerek fejlődésével először a **katonai**, majd a **polgári** (jellemzően utasszállító) **gépek** esetében **megjelentek a rádiónavigációs** (ADF, VOR) rendszerekhez tartozó **autopilóták**, majd **automatikus leszállító rendszerek** (ILS) is.

Napjainkban, a fly-by-wire rendszer elterjedésével (pl. Airbus A300 család) a repülőgépet felszállástól leszállásig az robotpilóta vezérli (kiküszöbölendő az emberi hibát), a pilóta csupán kisebb változásokat tud végrehajtani manuálisan.

A 80-as évektől, jellemzően katonai célra, egyre nagyobb teret hódítottak a robotrepülőgépek, kezdetben célszolgálatként, később felderítési célokra.

A 80-90-es évektől széles körben elterjedtek a rádiófrekvenciás modellrepülőgép adó-vevők, melyekkel a lehetőség nyílt a modellrepülőgépek valós idejű kézi vezérlésére. Ennek köszönhetően megjelentek az olyan földről irányított pilóta nélküli légi járművek, melyekkel valamilyen felderítési, légi fényképészeti feladatot hajtottak végre (Góliát), mivel ezek üzemeltetési költségei jóval alacsonyabbak a nagy repülőgépekénél.

Napjainkban az olcsó elektronikai cikkeknek, nagy kapacitású és könnyű akkumulátoroknak valamint nagy teljesítményű elektromotoroknak köszönhetően olyan modellrepülőgépek terjedtek el, melyeket a földről élőképfelvételek alapján (fedélzeti panelkamera, 200 mW - 1500 mW teljesítményű 1,2 GHz - 5,8 GHz frekvenciájú videóadó és egy videószemüveg segítségével) vezetnek akár 10 km távolságból.

**Különbséget kell tenni a kis- és a nagy méretű robotrepülőgépek között.** A a kis méretű katonai és civil pilóta nélküli repülőgépek **tömege 1-10 kg, szárnyfeszításvastagságuk 1-3 m**, meghajtásuk jellemzően **elektromos**, akciórádiuszuk 5-10 km, maximális repülési idejük 0,5-1,5 óra, hasznos teherbírásuk pedig csekély, nagyjából 1 kg.

Az ebbe a kategóriába eső gépek fedélzeti **autonóm repülésirányító rendszerei erősen korlátozottak méretükben, tömegükben és áramfelvételükben.** A nagyobb gépek esetében elfogadott és **általánosan használt nagyobb hardverek, le- és felszállást segítő szenzorok, lézergiroszkópok** (pl. radaros, lézeres magasságmérő, műholdas kommunikáció, nagy teljesítményű fedélzeti PC, rádiónavigációs rendszerek, többszörösen redundáns robotvezérlő stb.) **illetve eljárások** (pl. fedélzeti képfeldolgozás, hibakereső és izoláló rendszerek stb.) a felsorolt okokból kifolyólag a **kisméretű gépeknél nem alkalmazhatóak.**

## 2. Célkitűzések

A **nagyméretű robotrepülőgépet** általánosságban összetett mozgásegyenletek felhasználásával **komplex matematikai modell alapján fejlesztik.** Ez a megközelítés

tökéletes egy adott szabályzási elv - robotrepülőgép párhoz, legyen az klasszikus frekvenciatarománybeli módszer, állapottér elméletet felhasználó, optimális, robusztus vagy éppen fuzzy szabályzás. A modell alapú prediktív (MPC) jellegű szabályozók alkalmazásakor azonban már problémát jelent azok erős modellfüggősége. Ezek a rendszerek érzékenyek a modell változására pl. elektromos meghajtásról robbanómotorra történő váltás vagy sárkányszerkezet módosulás. Egy ilyen, specifikus fedélzeti autonóm irányítási rendszer a matematikai komplexitása miatt nem képes ezeket a változásokat gyorsan könnyen kezelni.

**Kisméretű pilóta nélküli légi járművek** irányításához gyakorta **elegendők** linearizált modellekre kidolgozott **egyszerűbb**, pl. PID **szabályozók**, mivel üzemszerű repüléskor, meghatározott korlátok mellett ezek a rendszerek kielégítően közelítik a rendszer nemlinearitását [1]. Ezen szabályzók **paramétereit** általában **jól becsülhetők**, szimulációs eljárásokkal elfogadhatóan behangolhatóak a modellezési hibák ellenére is.

A kisméretű gépek esetében **nem alkalmaznak sem részlegesen, sem teljesen redundáns fedélzeti rendszereket** valamint **hibakereső és izoláló eljárásokat sem**. Egy egyszerű **szenzor-, aktuátor- vagy meghajtásban bekövetkezett hiba** gyakorta a **gép törésével jár**.

**Kutatási céljaim:**

- Olyan **redundáns robotpilóta rendszer** kialakítása kisméretű robotrepülőgépek számára, amely képes előre meghatározott számú **részegységeit** szoftver vagy hardver **hibáinak bekövetkezése esetén** is a tervezettnek **megfelelő működésre**.
- Olyan intelligens **hibakezelő algoritmus** kidolgozása, amely képes a **redundáns rendszer részelemeinek meghibásodása esetén azok kiváltására** úgy, hogy a teljes rendszer továbbra is működőképes marad.
- Olyan **navigációs eljárás** kidolgozása, amelynek segítségével jelentősen **redukálhatóak** az eddig alkalmazott navigációs rendszereknél alkalmazott **eljárások paramétereit**, miközben azok **minőségi jellemzői nem romlanak**.
- Olyan **fel- és leszállási eljárás** kidolgozása, amely mellőz mindenféle – a nagygépes üzemben nélkülözhetetlen – külső és belső, fedélzeti és repülőtéri kiegészítőt, de megőrzi annak minőségi jellemzőit.
- Olyan komplex **rendszer** kidolgozása, amely képes a **valódi hardver működését és a környezeti hatások** szimulációját **együttesen kezelni** és ez által lehetőséget biztosít a teljes szabályzó rendszer viselkedésének elemzésére, hangolására.
- Olyan komplex rendszer kialakítása, amely **működésével demonstrálja** az előző pontokban meghatározott rendszereim alkalmazhatóságát.

### 3. Vizsgálati módszerek

Értekezésemben megvizsgáltam a már létező magyar és külföldi pilóta nélküli légi járműveket és tanulmányoztam azok autonóm irányítási rendszereit [2][3].

Kategorizáltam e rendszereket méret és tömeg szerint, részletesen bemutatva a **kisméretű robotrepülőgép** osztályt. A kutatás során kiemelt figyelmet fordítottam a különleges légi járművek, ezek belül a 'delta' és 'csupaszárny' kialakítás elemzésére, előnyeire és hátrányaira, robotikai felhasználására.

Elemeztem a repülőgépek **modellezési** lehetőségeit [4][5][6], megvizsgáltam az **áramlástani** összefüggéseket [7][8], különös tekintettel a repülési **sebesség** és a repülőgép **stabilitását** tekintve.

Bemutattam a különböző kialakítású (klasszikus, delta- és csupaszárny) repülőgépeket, külön kiemelve a köztük lévő aerodinamikai és irányítási különbségeket.

Munkám során megvizsgáltam a **kisméretű robotrepülőgépeknél** alkalmazott **navigációs** [9] és **szabályozási** eljárásokat, úgy mint a modell alapú prediktív- [10], fuzzy- [11][12], adaptív- [13][14] illetve a robusztus változó struktúrájú, csúszó mód- valamint az állapotter leírason alapuló szabályozókat és eljárásokat [15][16][17][18][19][20][21][22].

A **kisméretű robotrepülőgépek** fedélzeti rendszereinek tervezése során azok **méreteiből** és **szerkezeti struktúrájukból** adódóan olyan hatásokat lehet **elhanyagolni** (pl. a szárnyra ható rezgések, kormányfelület deformációk stb.) melyeket a nagyobb gépek esetében mindenképpen figyelembe kell venni.

**Sok esetben kevésbé összetett**, pl. PID típusú **szabályozók** is **elegendők** a **kielégítő** sebesség-, magasság- és iránytartáshoz [1].

Normál útvonalrepülés során a gépre ható nemlinearitások jól közelíthetők lineáris szakaszokkal azok trimhelyzetében, pl. a gép repülése során olyan magasságban illetve állandó, ún. utazósebességgel repül, hogy a légsűrűség változás elhanyagolható, valamint a sebesség változással sem kell kalkulálni. Ezekből kifolyólag a robotrepülőgépet **lineáris idő invariáns (LTI)** rendszerként lehet leírni.

Következtetésképpen **kisméretű** robotrepülőgépek esetében, ahol a fedélzeti elektronika és a számítási kapacitás is erős korlátokkal bír, elegendő a bemutatott **PID** illetve **nemlineáris harmadfokú** szabályozó, melyek **kielégítő gyakorlati eredményekkel** szolgálnak.

Ezen szabályozók hangolásában korábbi munkáimból (PID: Zeigler-Nichols-, nemlineáris harmadfokú: empirikus illetve szimulációs eljárás) kifolyólag (lásd. BH-03) széles körű tapasztalatokkal rendelkezem.

**Megalkottam egy modell alapú szimulációs kontrollált tesztkörnyezetet**, melynek segítségével **tesztelni lehet** a robotrepülőgépek **irányítását, szabályzását és navigációját biztonságos és ellenőrzött körülmények között** ideális vagy zajos szenzorértékekkel [23][24]. A rendszer alkalmas továbbá **kritikus manőverek** (fel- és leszállás), **vészhelyzetek** (motorleállás, aktuátor hiba, szenzorhiba, GPS pozíció vesztés stb.), valamint **extrém időjárási viszonyok** (nagy erejű, turbulens szél) között történő **repülés tesztelésére**.

Munkám során megterveztem a fedélzeti autonóm irányítási rendszeremet. A kutatás során elemeztem az autonóm és manuális irányítási lehetőségeket, illetve megalkottam saját eljárásomat valamint bevezettem az ún. **heterogén üzemmódot**. Megvizsgáltam a kisméretű robotrepülőgépek üzemeltetése során felmerülő legfontosabb repülésbiztonsági kérdéseket. Megalkottam egy **többszörösen redundáns fedélzeti irányítási rendszert**, mellyel a pilóta nélküli légi járművek üzemeltetésének biztonsága a jelenleg alkalmazott rendszereket jelentősen meghaladja valamint lehetőség van különböző

szabályozást megvalósító autópilóták alkalmazására.

A pilóta nélküli légi járművek **fedélzeti robotrendszereinek kialakítása során rendkívüli jelentőséggel bír e rendszerek robusztus kialakítása**. A robotrepülőgépek folyamatosan alkalmazkodnia kell az állandóan változó közeghez, amelyben repül, oly módon, hogy a repülés biztonságát eközben meg kell őriznie. Különböző parciális rendszerhibák esetén megengedhetetlen, hogy a repülőgép irányíthatatlanná váljon. Ennek érdekében a fedélzeti robotrendszereket úgy kell kialakítani, hogy azok a **különböző szoftveres vagy hardveres** (pl. szenzor-, program- vagy beavatkozó szerv hiba) **meghibásodások esetén is képesek legyenek a feladatuk végrehajtására**.

**Az általam megalkotott autonóm vezérlő a gép helyzeti energiáját alakítja át mozgási energiává a magassági kormányal történő sebesség szabályzással**. Ennek köszönhetően valósul meg a hatásos sebességszabályzás meghajtás nélkül, mivel a felhajtóerő legnagyobb részét a sebesség négyzete adja. **Így kiküszöbölhető az átesés, amennyiben a motor meghibásodna, vagy az akkumulátor lemerülne, hasonlóan, mint a vitorlázó repülőgépek esetében**.

A csupaszárny repülőgépek általában nem rendelkeznek függőleges vezérsíkkal, maximum csak a szárnyvégen elhelyezkedő kisméretű függőleges stabilizátorral, ún. winglettel. Ebből kifolyólag nem rendelkezik hatásos oldalkormányal sem.

**A különleges kialakítású kísérleti gépeimhez fejlesztettem egy drag rudder (oldalkormány-féklap) eljárást**. A drag rudder alapvetően egy forgatónyomatékokat kiváltó légfék rendszer, amelyet szárnyanként (oldalanként) lehet vezérelni.

A szárnyon középen két magassági, a szélén pedig két csűrőkormány van. A csűrő és magassági kormány mérete azonos. Adott irányú fordulóban csak az adott irányú csűrő az oldalkormány parancsra megfelelően 100%-ban felfele, a magassági pedig 50%-ban lefele tér ki (1).

$$\begin{aligned}
 D_L &= \begin{cases} \text{ha } \delta_{RuddCMD} < 0, \text{ akkor } 1 \\ \text{egyébként } 0 \end{cases} \\
 D_R &= \begin{cases} \text{ha } \delta_{RuddCMD} > 0, \text{ akkor } , 1 \\ \text{egyébként } 0 \end{cases} \\
 \delta_{EleL} &= \delta_{EleCMD} - \frac{\delta_{RuddCMD}}{2} D_L \\
 \delta_{EleR} &= -\delta_{EleCMD} - \frac{\delta_{RuddCMD}}{2} D_R \\
 \delta_{AilL} &= \delta_{AilCMD} + \delta_{RuddCMD} D_L \\
 \delta_{AilR} &= \delta_{AilCMD} + \delta_{RuddCMD} D_R
 \end{aligned} \tag{1}$$

ahol:

- $\delta_{EleL}$ : Bal oldali magassági kormány kitérési mértéke,
- $\delta_{EleR}$ : Jobb oldali magassági kormány kitérési mértéke,
- $\delta_{AilL}$ : Bal oldali csűrő kormány kitérési értéke,
- $\delta_{AilR}$ : Jobb oldali csűrő kormány kitérési értéke,
- $\delta_{AilCMD}$ : Csűrő kormány vezérlő parancsa,

- $\delta_{EleCMD}$ : Magassági kormány vezérlő parancsa,
- $\delta_{RuddCMD}$ : Oldalkormány vezérlő parancsa.

Ezzel az eljárással sikeresen lehet **csűrő és magassági kormányt oldalormány-féklapként használni**. Így a robotpilóta a forduló ívét pontosabban tudja megrepülni, valamint egyenes repülésben, a csupaszárnyakon jelentkező laterális instabilitást aktívan csökkenteni tudja).

Ezt a **kormányzást** fel lehet használni **hibatűrő szabályzás újrahangolás** esetén is (fault tolerant control reallocation). Fly-by-wire rendszerrel rendelkező utasszállítók esetén alkalmaznak FDI (hibakereső és izoláló) rendszereket [25]. Az **oldalkormány** illetve **magassági kormány** vezérlésének **elvesztése esetén** is meg lehet tartani a gép irányítását és meg lehet előzni a katasztrófát.

Kisméretű robotrepülőgépek esetén az idáig alkalmazott eljárások a gyakorlatban bizonyítottak ugyan, de rendkívül összetettek [26][27].

A csupaszárnyakra kidolgozott leképezést alapul véve a főszárny hibátlan kormányfelületei átveszik a hibás magassági és oldalkormány szerepét (külön szimmetrikus kitérésű féklappal rendelkező és pedig féklap nélküli repülőgépekre megadva).

Munkám során **elemeztem** a fedélzeti **navigációs és irányítási rendszereket**. Megvizsgáltam a civil globális pozicionáló rendszer (GPS) és inerciális navigációs rendszerek alkalmazhatóságát. **Elemeztem** az eddig széles körűen alkalmazott, több paraméteres **klasszikus navigációs eljárásokat**, javaslatot tettem azok javítására.

A **klasszikus navigáció** és az arra alapuló eljárások hátránya, hogy **több független paraméterrel** rendelkeznek, melyek beállításához intuíció és nagymértékű gyakorlat szükséges. További hátránya, hogy **nem lehet könnyen vizualizálni** az adott pozícióhoz és útvonalhoz tartozó mindenkori **kívánt haladási irányt**, csupán részparaméterek elhagyásával.

Az **általam kidolgozott navigációs eljárás ezeket a hibákat kívánja kiküszöbölni, úgy, hogy közben a minőségi jellemzői nem romlanak**.

**Kidolgoztam egy eljárást** a haladási irány és a pozíció folyamatos becslésére, mely a fedélzeten lévő szenzorok alapadatait felhasználva, az addig alkalmazott eljárásoknál **pontosabb navigációt** eredményez.

A **navigáció minden egyes adott (számított) koordinátapárhoz hozzárendel egy kívánt haladási irányt, amely függ a forrás és cél fordulópontoktól, illetve az általuk meghatározott útvonaltól való eltéréstől**.

Ez legegyszerűbben egy **vektormezőként** fogható fel. A kívánt haladási irány ( $\varphi_d$ ) függ a repülő pozíciójától, a cél fordulópont irányától ( $\varphi_T$ ), az útvonal irányától ( $\varphi_R$ ) és az attól való távolságtól ( $D_{CT}$ ) (2, 3, 4).

$$\delta = \sqrt[\kappa]{|D_{CT}K_c(\varphi_T - \varphi_R)|\text{sign}(D_{CT})} \quad (2)$$

$$\gamma = \min(1, D_T) \quad (3)$$

$$\varphi_d = \varphi_T + \delta\gamma \quad (4)$$

$K_c$  paraméterrel lehet az útvonalon tartás erősségét állítani,  $K_d$  paraméterrel pedig az útvonalra történő rávezetés erősítését lehet finomítani,  $\gamma$  pedig a célponttól való távolság ( $D_T$ ) alapján biztosítja annak mindenkori elérését.

Robotrepülőgépek esetén gyakori hiba, hogy a gép az adott célpontot elvétí, azaz nem sikerül azt az előírt sugarú rádiuszban megközelíteni, így arra vissza kell fordulnia. Ennek a hibának a kiküszöbölésére  $\gamma$  a fordulóponthoz közeledve fokozatosan lecsökkenti nullára az útvonalra tartást. Csak a csillag irányú célpontra tartást juttatja érvényre, így biztosítva annak mindenkorai elérését. Az előnye a navigációnak, hogy előre beállított  $K_c$  ( $10, 0$ ),  $K_d$  ( $0, 5$ ) értékek mellett csak egy kimenete van, a  $\varphi_d$  kívánt haladási irány az eddig alkalmazott útvonaltól való eltérés és útvonal szöghiba helyett.

Ehhez a navigációhoz, mivel összesen **csak egy értéket** (kívánt és a megvalósult haladási irány különbségét) **kell csökkenteni, egyszerű különféle szabályzók illesztése** (pl. harmadfokú nemlineáris, PID, fuzzy). További előny, hogy az összefüggés minimális változtatással (5) **alkalmas a célpont felett körkörös navigációra**, amely alkalmas egy adott terület hosszan tartó megfigyelésére.

Megalkottam kísérleti robotrepülőgép platformjaimat, melyek segítségével tesztrepüléseket hajtottam végre. Különböző méretű és kialakítású gépeket készítettem, melyekkel éles tesztrepülések sorozatával igazolni tudjam rendszerem rugalmasságát és sokoldalúságát. A kísérleti gépek között van klasszikus 'T' vezérsíkkal rendelkező (Trainer60, SkyWalker), illetve speciális, csupaszárny kialakítású (Xeno, StyroWing) különleges légi jármű.

$$\varphi_d = \varphi_T + \frac{\pi}{2} + \min\left(|D_{CT}K_c|, \frac{\pi}{2}\right) \text{sign}(D_{CT}) \quad (5)$$

ahol:

- $D_{CT}$  Útvonaltól (fordulópont rádiusztól) való távolság,
- $\varphi_d$  Kívánt haladási irány,
- $\varphi_T$  Célpont irányszöge az UAV-hoz képest.

**Megvizsgáltam** a kisméretű robotrepülőgépeken alkalmazható klasszikus és modern **irányítási rendszereket** (PID, nemlineáris harmadfokú illetve fuzzy). Fedélzeti irányítási rendszeremet úgy alkottam meg, hogy több, különböző irányítási rendszert képes legyen kezelni, és akár köztük a levegőben, repülés közben váltani. .

Megvizsgáltam a nagygépes repülésben alkalmazott fel- és leszállási technikákat [8][28][29][30]. Ezeket alapul véve **kidolgoztam saját** kisméretű robotrepülőgépekben alkalmazható egyszerű, de precíz **fel és leszállási algoritmusomat**, mely mellőz mindenféle – a nagygépes üzemben nélkülözhetetlen – külső és belső repülőtéri kiegészítőt. Működésében az ILS műszeres automatikus leszállító rendszerhez hasonlít, de mellőzi annak nélkülözhetetlen alkotórészeit.

Az éles tesztrepülések kimutatták, hogy a rendszer **robustus**, a robotrepülőgép sebességével egy nagyságrendben lévő erős szélben is megfelelően működik.

## 4. Új tudományos eredmények

A **kisméretű** pilóta nélküli légi járműveknél eddig alkalmazott **klasszikus navigáció** és az arra alapuló eljárások hátránya, hogy **több független paraméterrel — útvonaltól való távolság, célpont és útvonal iránya valamint haladási irány —** rendelkeznek,

melyek beállításához intuíció és nagymértékű gyakorlat szükséges. További hátránya, hogy **nem lehet könnyen vizualizálni** az adott pozícióhoz és útvonalhoz tartozó mindenkori **kívánt haladási irányt**, csupán részparaméterek elhagyásával. Az általam kidolgozott navigációs eljárás ezeket a hibákat küszöböli ki, mivel a kívánt haladási irány könnyen vizualizálható illetve csak egyetlen kimeneti paraméterrel rendelkezik.

A megalkotott modell alapú **szimulációs kontrollált tesztkörnyezet** alkalmas a **kisméretű** robotrepülőgépek **irányításának, szabályzásának és navigációjának** **tesztelésére biztonságos és ellenőrzött körülmények között**, oly módon, hogy a rendszerhez a komplett repülőeszköz csatlakoztatva van, és ellenőrizhető a teljes állapota (aktuátorok viselkedése, kormányfelület kitérések stb.).

Különleges kialakítású légi járművek számára kidolgoztam egy fékszárny-oldalkormány eljárást, melyet fel lehet használni **hibatűrő szabályzás újraelosztás** esetén is. Az **oldalkormány** illetve **magassági kormány** vezérlésének **elvesztése esetén** így meg lehet tartani a gép irányítását és meg lehet előzni a katasztrófát, oly módon, hogy a **hibátlan kormányfelületek** (a főszárnyon lévő csűrőkormányok és féklapok) **átveszik a hibásak szerepét**. Ilyen rendszert a vizsgált robotrepülőgép kategóriában ezidáig nem alkalmaztak. A **kisméretű** pilóta nélküli légi járműveknél eddig nem alkalmaztak teljesen és többszörösen redundáns fedélzeti robotkialakítást, annak ellenére, hogy ez nagymértékben növeli a teljes rendszer biztonságát.

Megvizsgáltam a nagygépes repülésben alkalmazott fel- és leszállási technikákat. Ezeket alapul véve **kidolgoztam saját** kisméretű robotrepülőgépekben alkalmazható egyszerű, de precíz **leszállási algoritmusomat**, mely mellőz mindenféle – a nagygépes üzemben nélkülözhetetlen – külső és belső repülőtéri kiegészítőt.

### • 1. Tézis:

Olyan új vektormezős navigációs modellt vezettem be, amelynek segítségével jelentősen csökkenthető a nemlineáris rendszereknél alkalmazott eljárások független paramétereinek száma, miközben a navigáció minőségi jellemzői a klasszikus megközelítés jellemzőihez képest nem romlanak, s amely azzal jellemezhető, hogy

- kifejezetten kisméretű autonóm irányítású robotrepülőgépekre specifikus,
- a hagyományos háromparaméteres (útvonaltól való távolság, útirány és haladási irány közti szöghiba, illetve globális erősítés) megoldásokkal szemben, amelyek mindhárom paraméterre külön-külön alkalmaznak visszacsatolást, egyetlen visszacsatoló jelet állít elő,
- ezáltal elkerüli a fordulópont elvétésekor a hagyományos megoldás mellett előforduló visszafordulási-hajlam hiányt, továbbá
- bármely pozícióban egyértelmű haladási irányt határoz meg, és
- a tervezett útvonaltól nagy távolságban autonóm irányítási módba átkapcsolva a hagyományos eljárásokhoz képest kevesebb ingadozással, ezáltal rövidebb útvonalon közelíti meg a célt. [A1][A4][B7]

### • 2. Tézis

A navigációs eljárások (a klasszikus, valamint azok általam kidolgozott kétféle módosítása, az új, vektormezős navigációs módszer, illetve a fel- és leszállás)



tesztelése céljából kifejlesztettem egy olyan új szimulátort, amelyhez hasonló rendeltetésű a kereskedelmi forgalomban a dolog jellege miatt korlátozottan vagy egyáltalán nem hozzáférhető, a valódi kisméretű repülőgépekhez csatlakoztatható, képes a környezeti hatások és tetszőleges szenzorhibák rugalmas szimulálására, a repülő teljes állapotának ellenőrzésére. [B2][B5][B6]

- **3. Tézis**

Olyan autonóm fedélzeti repülésirányító rendszert hoztam létre, amely egyrészt a fedélzeti robothardver részegységei, másrészt meghatározott beavatkozó szervek meghibásodása esetén képes a meghibásodás következményeinek kompenzálására úgy, hogy a repülési feladat továbbra is végrehajtható marad. Az általam kidolgozott és megvalósított megoldás a következő jellemzőkkel rendelkezik:

- a rendszerben minden egyes robotegység olyan egyenértékű részrendszert képez, melyek közt nincs előre definiált hierarchikus sorrend,
- olyan fékszárny-oldalkormány eljárást alkalmaz, amelynek segítségével hatásosan lehet kisméretű csupaszárny repülőgépeket irányítani a vertikális tengely körül, függőleges vezérsík és kormány nélkül, valamint
- alkalmas hagyományos kialakítású repülőgép irányítására a magassági- és oldalkormányban bekövetkezett hiba esetén oly módon, hogy a főszárnyon lévő kormányfelületek működését a csupaszárny működéséhez hasonlóan használja. [A3][B1][B3][B8]

- **4. Tézis**

Kisméretű robotrepülőgépek adott, repülőtér-független pozícióba való leszállítására olyan eljárást dolgoztam ki, amely a nagygépes műszeres automatikus leszállítórendszerektől jelentősen különbözik abban, hogy kizárólag a fedélzeti mérőeszközökre támaszkodva biztonságos siklópályán leszállítja a gépet. Ez a rendszer jelentősen növeli a robotrepülőgépek működési megbízhatóságát. [A2][B4]

## **5. Az eredmények hasznosítási lehetősége**

Az általam megalkotott fedélzeti autonóm repülésirányító rendszer, a kidolgozott eljárásaimmal több mint tíz kisméretű, különböző tömegű és kialakítású robotrepülőgépben sikeresen bizonyított az elmúlt pár év kutatása során. Az Óbudai Egyetem magyar és külföldi partneri sikerrel alkalmazták eljárásaimat több, különböző kialakítású kis méretű pilóta nélküli légi járműben.

A megalkotott eljárásaim (vektormezős navigáció, komplex szimulációs rendszer, redundáns robotkialakítás, intelligens hibakezelő algoritmus valamint fel- és leszállás) alkalmazhatóak kisméretű civil, katonai, üzleti vagy oktatási célú robotrepülőgépek, fedélzeti autonóm irányítási rendszerek fejlesztése során.

## 6. Irodalmi hivatkozások listája

- [1] S. Leven, J. Zufferey, D. Floreano: "A minimalist control strategy for small UAVs", Proc. IROS, 2009, pp. 2873-2878.
- [2] Molnár A.: "A polgári és katonai robotjárművek fejlesztésében alkalmazott új eljárások és technikai megoldások", PhD értekezés, ZMNE, Budapest, 2006
- [3] Koncz M. Zs.: "A Meteor-3R célrepülőgép alkalmazása és elektronikai rendszerei", PhD értekezés, ZMNE, Budapest, 2009
- [4] D. McLean: "Automatic Flight Control Systems", Prentice-Hall International Ltd., 1990, ISBN: 978-0130540089
- [5] Bokor J., Gáspár P.: "Írányítástechnika járműdinamikai alkalmazásokkal", Typotex, 2008, ISBN: 978 963 279 001 5
- [6] Szabolcsi R.: "Modern automatikus repülésszabályozó rendszerek", Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 2011, ISBN 978-963-7060-32-8
- [7] Jereb G.: "Vitorlázó repülőgépek", Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977, ISBN: 963 10 1711 7
- [8] B.W. McCormick: "Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics", Wiley, 1979, ISBN: 978-0471575061
- [9] B. Vanek, T. Peni, J. Bokor, G. Balas: "Practical approach to real-time trajectory tracking of UAV formations", American Control Conference, 2005. pp. 122- 127 vol. 1, 8-10 June 2005
- [10] L. Singh, J. Fuller: "Trajectory generation for a UAV in urban terrain, using nonlinear MPC", American Control Conference, 2001. Proceedings of the 2001 , vol.3, pp.2301-2308 vol.3, 2001
- [11] Lantos B.: Fuzzy systems and genetic algorithms, 2001, Műegyetemi kiadó, Budapest
- [12] R. Precup, S. Preitl, J.K. Tar, M.L. Tomescu, M. Takács, P. Korondi, P. Baranyi: "Fuzzy control system performance enhancement by iterative learning control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(9), 3461-3475.
- [13] Csáki F.: "Korszerű szabályozáselmélet", Akadémiai Kiadó, Budapest, 1970
- [14] J.K. Tar, L. Nádai, I.J. Rudas, K. Eredics: "Új irányzat a Modell-referenciás Adaptív Szabályozók kialakításában: a Lyapunov-függvények kiváltása Robusztus Fixpont Transzformációkkal", Innováció és fenntartható felszíni közlekedés – konferencia (IFFK-2010). Budapest, Hungary, 02/09/2010-04/09/2010, Budapest: Magyar Mérnök Akadémia, pp. 1-11.
- [15] W. MacKunis, Z.D. Wilcox, M.K. Kaiser, W.E. Dixon: "Global Adaptive Output Feedback Tracking Control of an Unmanned Aerial Vehicle", Control Systems Technology, IEEE Transactions, vol.18, no.6, pp.1390-1397, Nov. 2010

- [16] Kovács L.A.: "Új elvek és céladekvált algoritmusok kidolgozása az inzulinszabályzásra I-es típusú cukorbetegség esetében", PhD értekezés, BME, 2007
- [17] B. Kulcsár : "Design of Robust Detection Filter and Fault Correction Controller", PhD dissertation, BME, Hungary, 2005
- [18] K. Natesan, D. Gu, I. Postlethwaite, J. Chen: "Design of Flight Controllers based on Simplified LPV model of a UAV", Decision and Control, 2006 45th IEEE Conference on Decision and Control, pp.37-42, 2006
- [19] Z. Szabó, P. Gáspár, J. Bokor: "A novel control-oriented multi-affine qLPV modeling framework", Control and Automation (MED), 2010 18th Mediterranean Conference on Control and Automation, pp.1019-1024, 23-25 June 2010
- [20] P. Baranyi: "TP model transformation as a way to LMI-based controller design," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.51, no.2, pp. 387- 400, April 2004
- [21] P. Baranyi, L. Szeidl, P. Varlaki, Y. Yam: "Definition of the HOSVD based canonical form of polytopic dynamic models", IEEE International Conference on Mechatronics, pp.660-665, 3-5 July 2006
- [22] B. Takarics : "TP Model Transformation Based Sliding Mode Control and Friction Compensation", PhD dissertation, BME, Hungary, 2011
- [23] Michelberger P., Szeidl L., Várlaki P.: Alkalmazott folyamatstatisztika és idősor-analízis, Typotex Kft, Budapest, 2001, ISBN 963 9132 44 6
- [24] Y. C. Paw, G. J. Balas: "Parametric uncertainty modeling for LFT model realization", 2008 IEEE Int Symposium on Computer-Aided Control System Design, USA, September 3-5, 2008
- [25] G. J. J. Ducard: "Fault-tolerant Flight Control and Guidance Systems Practical Methods for Small Unmanned Aerial Vehicles", Springer-Verlag London Limited, 2009, ISBN 978-1-84882-560-4
- [26] S. Fekri, D. Gu; N. Khan, I. Postlethwaite: "Fault detection, isolation, and accommodation in a UAV longitudinal control system", Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), 2010, pp.245-250, 6-8 Oct. 2010
- [27] Y. Zhang, V.S Suresh, B. Jiang, D. Theilliol: "Reconfigurable Control Allocation against Aircraft Control Effector Failures", Control Applications, 2007. CCA 2007. IEEE International Conference on Control Applications, pp.1197-1202, 1-3 Oct. 2007
- [28] F. Roepcke: "ILS - past and present", Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, Volume: 5, Issue: 5, May 1990, pp. 9 - 11.
- [29] R.H. McFarland: "ILS - A Safe Bet for Your Future Landings", Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, Volume: 5, Issue: 5, 1990, pp. 12-15.
- [30] W. Rui, Z. Zhou, S. Yanhang: "Robust Landing Control and Simulation for Flying Wing UAV", Proceedings of the 26th Chinese Control Conference, 2007, China, pp600 - 604.

## 7. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

### Folyóirat cikkek

- [A1] **D. Stojcsics**: “Autonomous Waypoint Navigation Methods for Small Size Unmanned Aerial Vehicles”, Acta Polytechnica Hungarica, 2012. év, 4. szám, Budapest, ISSN 1785-8860 (megjelenés alatt)
- [A2] **D. Stojcsics**, A. Molnár: “Autonomous Takeoff and Landing guidance for Small Size Unmanned Aerial Vehicles”, Computing and Informatics, 2012, ISSN 1335-9150 (megjelenés alatt)
- [A3] Molnár A., **Stojcsics D.**: “Kisméretű robotrepülőgépek fedélzeti robotrendszerének robosztus kialakítása”, Hadmérnök, V. Évfolyam 4. szám, 2010. December, Budapest, ISSN 1788-1919, pp.227-234.
- [A4] **D. Stojcsics**, A. Molnár: “AirGuardian – UAV hardware and software system for small size UAVs”, International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, Croatia, ISSN 1729-8806 (megjelenés alatt)

### Konferenciakiadványban megjelent cikkek

- [B1] **Stojcsics D.** – Léczfalvy Á.: „Katasztrófavédelmi és kárelhárítási célú robotrepülőgép rendszer”, XXIX OTDK, Műszaki Tudományi Szekció, Miskolc, 2009, I. helyezés
- [B2] Molnár A. - **Stojcsics D.**: „HIL szimuláció a robotpilóta fejlesztésben”, Repüléstudományi Konferencia, Repüléstudományi közlemények különszám, 2011, Szolnok
- [B3] **D. Stojcsics**: “Heterogenous control of small size unmanned aerial vehicles”, Proceedings of 10th International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence and Informatics, ISBN: 978-963-7154-96-6, Budapest, Hungary, 2009, pp.745-752.
- [B4] A. Molnár, **D. Stojcsics**: “New approach of the navigation control of small size UAVs”, Proceedings of 19th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, IEEE Catalog Number: CFP1075J-CDR, ISBN: 978-1-4244-6884-3, Budapest, Hungary, 2010, pp.125-129.  
Digital Object Identifier: 10.1109/RAAD.2010.5524598
- [B5] **D. Stojcsics**, L. Somlyai: “Improvement methods of short range and low bandwidth communication for small range UAVs”, 8th IEEE International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, ISBN: 978-1-4244-7394-6, Subotica, Serbia, September 10-11, 2010, pp.93-97.  
Digital Object Identifier: 10.1109/SISY.2010.5647224
- [B6] A. Molnár, **D. Stojcsics**: “Fixed-wing small-size UAV navigation methods with HIL simulation for AERObot autopilot”, 9th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, ISBN: 978-1-4577-1975-2, Subotica, Serbia,

8-10 Sept. 2011, pp.241 - 245

Digital Object Identifier: 10.1109/SISY.2011.6034331

[B7] **D. Stojcsics**: “Fuzzy controller for small size unmanned aerial vehicles”, 10th Jubilee International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, ISBN: 978-1-4577-0195-5, Herl’any, Slovakia , January 26-28, 2012, pp.91-95

Digital Object Identifier: 10.1109/SAMI.2012.6208935

[B8] **D. Stojcsics**: “Flight safety improvements for small size unmanned aerial vehicles”, IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems 2012, Lisbon, Portugal, ISBN: 978-1-4673-2693-3 (pendrive); 978-1-4673-2692-6 (printed), pp.483-487

Digital Object Identifier: 10.1109/INES.2012.6249882