

Kosztolányi Tamás¹ – Kovács Gábor² – Kubovics Balázs³ – Makkay Imre⁴ – Papp Tímea⁵

ROBOTREPÜLŐGÉPEK REDUNDÁNS RENDSZEREI⁶

A „Repülésbiztonság növelése - madárriasztás robotrepülőgépekkel” kutatási programban jelentős számú autonóm robotrepülőgép alkalmazását tervezzük. A repülések biztonsága érdekében a fedélzeti és a földi irányító rendszer fontos elemeit többszörös tartalékkal kell működtetni. A normális és a meghibásodás esetén érvénybe lépő működtetést egy intelligens döntéstámogató rendszer biztosítja. A hibajelzések hatására automatikusan bekapcsolódó tartalékok és az emberi döntést/beavatkozást igénylő eljárásokat a tervezés során figyelembe kell venni. A kutatások jelen fázisában még nem állnak rendelkezésre üzemeltetési tapasztalatok, ezért a szigorúbb – és egyben költségesebb – megbízhatósági követelményekkel számolunk.

REDUNDANT SYSTEMS OF ROBOT AIRCRAFT

The „Increase Aviation Safety - Bird Scaring Robot Aircraft” research program is planned a significant number of autonomous robotic aircraft operation. For safety of the flight the board and the ground control important systems should be multiple operated. The normal operation and the procedures is applicable in case of failure of an intelligent decision support system. The error messages are automatically result of joining the reserves and the human decision / intervention procedures that require a series of planning must take into account. The present phases of the research are not yet available operating experiences, so the more stringent - and also more expensive - expect reliability requirements.

BEVEZETÉS

A fedélzeti és földi egységek a robotrepülőgépeknél is ki vannak téve a technikai, emberi és környezeti hatásoknak, melyek a működésük során az eredetileg tervezett folyamatok helyett valami eltérőt produkálnak – a parancsoknak nem engedelmessé válnak, önálló tevékenységbe kezdenek, vagy éppen sehova nem mozdulnak. Amint az ember vezette repülés szabályait vérrel írták, a robotrepülésben a sok törés, kényeszerleszállás, sőt károkozás adja a tanulságot – minden fontos funkcióra legyen „helyettes” is kijelölve (beépítve). Amint a sok száz utas életéért a fő- és a másodpilóta küzd a meghibásodott utasszállítón, a robotrepülőgépen sem szabad egyetlen rendszerre feltenni a küldetés sikerét (és költségét, ha más kellemetlenség is származik egy nemkívánatos eseményből).

A redundancia azt jelenti, hogy ha minden előírás szerint működött, akkor vittünk magunkkal egy haszontalan terhet – olyan berendezéseket, amelyek csak a primer rendszer meghibásodá-

¹ Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, rep.szolnok@gmail.com

² Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, kanonenvogel@freemail.hu

³ Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, kuboo1112@gmail.com

⁴ Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, makkay.imre@uni-nke.hu

⁵ Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, oh.papptimi@gmail.com

⁶ Lektorálta: Palik Mátyás, egyetemi docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, palik.matyas@uni-nke.hu

sa esetén aktivizálódna. Ha az üzemelés során szükség volt a második vonal bevetésére, akkor pedig (a mélyreható tanulságok levonásán túl) feltehetően „megúsztuk” egy eseményt. A túlbiztosítás mindig költséges – hogy megéri-e azt a védendő fedélzeti és földi berendezések feladata, fontossága szabja meg.

A NKE HHK KÜLI Katonai Repülő és Légvédelmi tanszék UAV laboratóriuma megfelelő környezetet biztosít az oktatók és hallgatók számára a kutatásokhoz és kísérletekhez. A nagy megbízhatóságú robotrepülőgépes rendszer elméleti kidolgozása, egyes elemeinek megépítése és kipróbálása – az Új Széchenyi Terv „TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások” támogatását is élvezzi.

Ez az írásmű összegzi a robotrepülőgépek egyes elemeivel kapcsolatosan született publikációink tanulságait. [1][2][3][4][5]

REDUNDANCIA MINT A TÖBBSZÖRÖZÖTT BIZTONSÁG ESZKÖZE

A robotrepülőgépek fedélzeti és földi rendszereiben a rendeltetésszerű működés szempontjából létfontosságú eszközöket, eljárásokat, programokat tartalékkal kell tervezni és üzemeltetni. A nagy értékű hasznos terhet szállító, veszélyes-, embertömegek feletti térben repülő, különösen fontos feladatra küldött légi járművek számára a biztonságot növelő többszörözött – legalább kettőzött – fedélzeti és földi irányító rendszer elemeket kell alkalmazni.

A működés szempontjából kiemelt fontosságú rendszerek:

- energiaellátás;
- meghajtás;
- avionika;
- navigáció;
- fel- és leszállító rendszer;
- repülésirányítás;
- kommunikáció.

A repülés biztonságát nem, de a feladat eredményes végrehajtásának valószínűségét növelik a redundáns hasznos teher (payload) elemek.

Energiaellátás

A fedélzet villamos energiával való ellátása különösen kritikus a robotrepülőgépek esetében, mert a vezérlő- és a működtető rendszerek túlnyomó többsége elektromos meghajtású. Az egyéb energiaforrások is – belső égésű motorok esetén a folyékony, vagy gáznemű üzemanyag, pneumatikus működtetőknek sűrített levegő – megfelelő tartalékkal kell, hogy rendelkezésre álljanak.

A fő energiaellátó rendszer meghibásodása esetén – a repülőgéptől és a feladattól függően – azonos, vagy csökkentett teljesítményű tartalék energiaforrást kell bekapcsolni. Az utóbbi a feladat megszakítása és hazatérés (vagy kényszerleszállás) energiaszükségletét fedezi.

Az elektromos hálózat zavara esetén a tartalék viszonylag egyszerűen bekapcsolható (a robotpilótáknál a szünetmentességet biztosítani kell), de a belsőégésű motor levegőben való újrain-

dítása – ha a fő üzemanyag ellátó rendszer okozta a leállást – nehézségekkel járhat.

A fedélzeti villamos energiát a kis- és a nagyáramú fogyasztók külön forrásról kapják – a terhelés hatására bekövetkező feszültség-ingadozást elkerülendő.

Meghajtás

A meghajtó rendszer rendeltetés szerinti működése – legyen az elektromos, vagy folyékony üzemanyagú – a repülés folyamán kulcsfontosságú. A meghibásodott hajtómű a repülőgépre nézve kényszerhelyzetet jelent, amikor nem a tervezett környezetben és nem hagyományos módon érhet földet.

A több hajtóművel rendelkező légi járművek egy-egy motor kiesését a meglévők nagyobb terhelésével kompenzálni tudják – bár az összteljesítmény általában így is csökken. Robotrepülőgépek esetén is célszerű az osztott hajtómű alkalmazása, de elektromos segédhajtómű bekapcsolása is lehetséges.

Avionika

A robotrepülőgép a fedélzeti elektromos vezérlő áramkörök meghibásodása esetén a repülési helyzetből egy irányítatlan lezuhanáshoz vezető pályára kerülhet. Ezt elkerülendő a fedélzeti avionikai elemek megkettőzése (többszörözése) és a meghibásodást kezelő logika beépítése szükséges. Gyakori a különböző mérőműszerek érzékelőinek a – befagyás, elszennyeződés, sérülés következtében jelentkező – hibája. A repülési paraméterek – sebesség, magasság, irány – mérésére több, lehetőleg eltérő eljárással dolgozó rendszer eredményeinek összevetésével működő avionikát kell alkalmazni.

A repülési magasság mérésére barometrikus, GPS, rádió és akusztikus eljárással működnek berendezések. A légsebességet a torlónyomás, illetve a szélhatással kompenzált GPS sebesség alapján lehet mérni. Az irányt a mágneses iránytű, a GPS és a földi irányadók (VOR, NDB, DME, TACAN, ILS) összevetésével lehet meghatározni. Az utóbbiak a robotrepülőgépeken nem jellemzőek – a méretük, tömegük miatt sem.

Navigáció

A navigációt a robotrepülőgép számára a GPS vevők adta koordináták, sebesség és magasságadatok biztosítják. A GPS vétel – nyitott térben – ma már 8-10 műhold átlagos megjelenésével folyamatosnak mondható. A zavarás lehetősége fennállhat nagy energiájú, hasonló frekvenciájú berendezése közelében. A GPS vevők gyártói eltérő algoritmussal működő berendezéseket forgalmaznak – a kapott eredményeknek viszont meg kell egyeznie. A GPS helyes működését ezért több, lehetőleg különböző típusú vevőberendezés jelei alapján kell elfogadni, megerősíteni.

Fel- és leszállító rendszer

A robotrepülőgépek számára (is) a fel és leszállás jelenti a legnagyobb kihívást. A helyből felszállni képes repülőgépeknek nincs szükségük bonyolult fel- és leszállító rendszerre, a merevszárnyúak pedig több eljárásból válogathatnak. A saját futóművel talajról felszállni, és ugyanígy kerékre leszállni – a „nagyrepülő” megoldás. Ha erre nincs lehetőség, akkor az indítás történhet segédberendezések igénybevételével – mint katapult, gumikötél, vagy kézből

eldobás. A lehetséges eljárást a robotrepülőgép tömege és a felszálláshoz szükséges sebessége is nagyban befolyásolja – 7 kg-nál nehezebb gépeket kézből már nem indítanak.

A leszállás végrehajtható automatikusan, vagy távirányítóval az adott területre irányítva (kerékre, vagy hasra). Ha ez nem lehetséges, akkor ejtőernyővel, vagy légzsákra esve lehet a csilapított földet érést megoldani. E két utóbbi eljárás a lehetséges redundáns elem a hagyományos kerékre vagy hasra leszállni képes gépeknél – meghibásodás esetén a vészleszállás végrehajtására.

Repülésirányítás

A földi repülésirányító rendszer – bár nincs kitéve a levegőben lévő repülőgépet fenyegető veszélyeknek – a küldetés sikerének egyik kulcsfontosságú láncszeme, ezért a redundancia igénye itt is jelentkezik. A bevetés tervező és irányító munkahelyek megkettőzése az alapvető követelmény – ami nem csak a berendezésekre, hanem az operátorokra is vonatkozik. A munkahelyek megkettőzése mellett a hosszabb bevetéseken az irányítási feladatok zökkenőmentes átadása/átvétele is rejt műszaki és emberi kihívásokat. 2006 áprilisában egy Predator a mexikói határnál ilyen figyelmetlen helycsere miatt zuhant le. A másodpilóta konzolján az üzemanyag csap a felszállás előtti zárt állapotban maradt, és amikor repülés közben átvette az irányítást a motor rögtön leállt – mire felfedezte az okot, a gép már a földre került. [6]



1. kép Ez a Predator egy kapcsolóállás áldozata lett⁷

Az irányító konzolok megkettőzése, tehát önmagában nem elegendő, de szükséges – éppen a műszaki meghibásodások esetére, amikor teljes értékű helyettesítésre van szükség. Ugyanígy kettőzött, szünetmentes áramforrás kell, hogy biztosítsa a földi rendszerek táplálását.

⁷ <http://lemonodor.com/archives/001391.html>

Kommunikáció

A földi repülésirányító rendszer – a robotrepülőgépen kívül – kapcsolatot tart a légtér forgalmáért felelős szolgálatokkal és a feladatokat szabóval. Mindhárom irányt fokozott biztonsággal, folyamatosan fenn kell tartani.

A robotrepülőgépekkel legalább két független rádiócsatornát építenek ki, a másik két irányban is több úton – vezetéken, rádióon, telefonon – biztosított az összeköttetés.

A MICROPILOT REDUNDÁNS MEGOLDÁSAI

Az 1995 óta működő kanadai MicroPilot [7] a világ egyik legismertebb robotpilóta-gyártó cége. A néhány száz grammos repülő modelltől a gázturbinás légicélig 65 országban több mint 750 alkalmazó használja az eszközeit. Népszerűek az iskolákban, egyetemeken, kutató intézetekben, a gazdaság különböző területein, de a védelmi szféra is szép számmal használ robot légi járművein MicroPilot berendezéseket.

A biztonságot növelő redundáns elemek megjelennek a MicroPilot berendezéseiben. A legfontosabb érzékelő-, irányító- navigációs feladatokat átfedéssel, tartalék eljárásokkal biztosítják be – ezzel is bizonyítva a fokozott követelményeknek való megfelelésüket.

Robotpilóta

A MicroPilot MP21283X [8] robotpilótája három teljesen egyenrangú egységet tartalmaz egy áramköri lapra integráltnak. A három, független szenzorokkal működő robotpilóta adatai egy központi “szavazó” egységbe kerülnek, amely folyamatosan értékeli a bejövő értékeket, a leginkább összezsengőket fogadja el, és ezeket adja ki a végrehajtó elemeknek.



2. kép A MicroPilot MP21283X háromszoros biztonságú robotpilótája⁸

A MicroPilot MP2128^{3X} –t az igazán fontos, veszélyes, költséges alkalmazásokra javasolják. Az MP2128^{3X} három HELI robotpilótát tartalmaz, sima átmenetet biztosítva a robotpilóták, ugyanígy a kommunikációs csatornák váltása közben.

⁸ <http://www.micropilot.com/products-mp21283x.htm>

A robotpilóták programozása szinkronizáltan, 11 soros (RS232, RS485) porton keresztül történik. Mindegyik robotpilóta független táplálású, 8 nagyáramú meghajtót és összesen 16 szervót (10 db 11 bites és 6 db 10 bites) tud vezérelni.

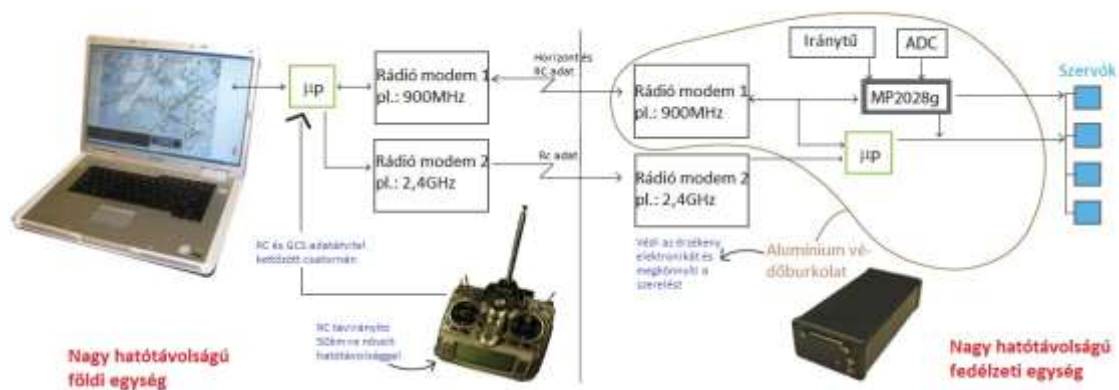
Kettős – Ublox és Novatel – GPS-el rendelkezik. Az éppen irányító GPS vevő 20Hz, a második, harmadik 4Hz frissítésű. 1000 fordulópontot tud kezelni, a tömege (GPS antennák nélkül) 859 gramm. Áramigénye 12V-ról 750 mA. A HORIZON^{mp} földi irányító állomás beépített szimulátorral „hardver-hurokban” képes működni.

Az adatcsatornán 24 féle információ küldhető. A lesugárzott video képre 16 féle – felhasználó által meghatározott – fedélzeti adatot lehet rámontírozni.

Rádiókommunikáció

A MicroPilot a repülőgép fedélzetére teljes duplex adatátviteli berendezést ajánl. A 2,4 GHz-es ipari csatornán működő berendezéssel, irányított antennával akár 20 km-es hatótávolság is elérhető. A földi állomás irányított antennával követi a repülőgépet, ami megnöveli a hatótávolságot és az adatátvitel biztonságát – különösen a gyakran manőverező, nagy bedöntésű fordulókat végrehajtó légi járművekkel. Az átviteli sebesség 2400 - 19600 baud között választható – a felhasználó igényeinek megfelelően.

A rádiókapcsolat biztonsága növelhető, ha ugyanarra a feladatra több csatornát párhuzamosan tudunk üzemeltetni. A MicroPilot ennek az igénynek a MP 2128^{g2} legújabb, negyedik generációs robotpilótákat felsorakoztató fedélzeti és Horizon^{mp} földi irányító rendszerrel felel meg. A rádiózavarok kizárására szórt spektrumú rádiócsatornákat, illetve kettőzött duplex adatcsatornákat ajánlanak. Az MP2028 LRC/2128LRC (Long Range Communication) változatokhoz két hullámtartományban – pl.: 900 MHz és 2,4 GHz – működő rendszert kínálnak. [9] Az 1W-os adóteljesítmény a hatótávolságot 50 km-re növeli. A kettőzött rádiócsatornák – a fedélzeten a robotpilótával együtt – egy-egy kompakt egységet alkotva a professzionális felhasználók számára ideális megoldást jelentenek.



1. ábra A MicroPilot MP2028 LRC/2128LRC földi és fedélzeti egysége⁹

⁹ <http://www.micropilot.com/products-mp2128lrc.htm> a szerzők fordítása

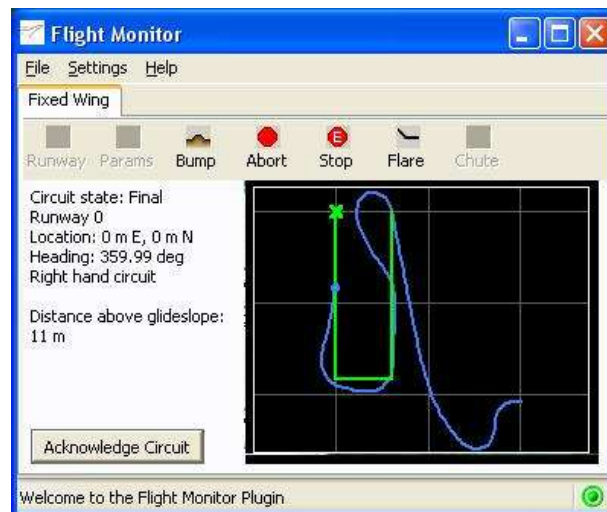
A MicroPilot automatikus fel- és leszállító rendszere

A MicroPilot fedélzeti robotjai – a Horizont földi irányító állomás programjával együtt – biztosítják a teljesen automatikus fel- és leszállás műszaki feltételeit.

A felszállás történhet a futópályáról, kerékről, az autó tetején elhelyezett indító állványról, katapult, vagy gumikötél segítségével illetve kézből eldobva. A felszállást a légsebesség és a GPS alapján mért sebesség előírt értékénél engedélyezi a fedélzeti automatika. A futópályáról végrehajtott automatikus fel és leszálláshoz akusztikus magasságmérő is szükséges.

A felszállási parancs kiadható az RC távirányítón 4 másodpercig teljes tolóerőt állítva, a repülőgépen elhelyezett „START” kapcsoló 4 másodperces nyomva tartásával, vagy a katapult kioldójával. A megfelelő sebesség elérése után a fedélzeti rendszer autonóm üzemre kapcsol és megkezd a feladat szerint a repülőgép irányítását. Ha a repülőgép valamilyen oknál fogva nem gyorsult fel az előírt sebességre, akkor a robotpilóta a felszállást nem engedélyezi – megszakítja.

A felszállás és a földet érés helye (magassága, orientációja) eltérhet egymástól. Az útvonalról visszatérő repülőgép egy iskolakör második (hátszeles) szakaszához csatlakozik és a rövid (keresztseles) fal után a megadott pályairányon lesüllyed a repülőtér megadott szintjéig.



3. kép A MicroPilot Horizon leszállási paramétereket előkészítő képernyője¹⁰

A MicroPilot a repülés közbeni meghibásodásokra előre megírt forgatókönyvvel rendelkezik:

1. az irányító szervek meghibásodása – vészleszállító rendszer (ejtőernyő) aktivizálása;
2. repülésképtelen állapot – vészleszállító rendszer (ejtőernyő) aktivizálása;
3. GPS jel elvesztése – vár az előírt ideig, ha nem áll helyre a./ vészleszállító rendszer (ejtőernyő) aktivizálása; b./ süllyedés a talaj szintjéig (motort nem leállítva, hátha közben visszaáll a GPS vétel);
4. a hajtómű meghibásodása – vészleszállító rendszer (ejtőernyő) aktivizálása;
5. lecsökken telepfeszültség – vészleszállító rendszer (ejtőernyő) aktivizálása;
6. RC távirányítás megszakad – „repülj haza” üzemmód;
7. adatcsatorna megszakad – „repülj haza” üzemmód (két perces várakozást követően).

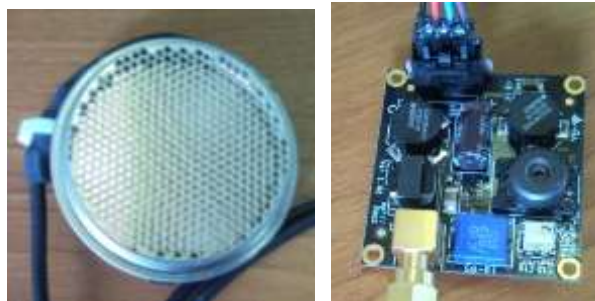
¹⁰ <http://www.micropilot.com/products-horizonmp.htm>

Ez utóbbi üzemmód megfelelő működését a földi előkészítés/programozás során ellenőrzik.

A „repülj haza” üzemmódban a felszállóhely felé indul el a repülőgép és – ha közben más parancs nem érkezik – megkezdje az előre programozott leszállási eljárást. Amint az RC távirányító, vagy az adatsatorna újból működik, a gép visszatér az előre programozott útvonal következő feladatára.

MicroPilot magasságmérők

A MicroPilot három egymástól eltérő működésű magasságmérőt alkalmaz a fedélzeten. A magasságmérés pontossága földközélen a fel és leszálláskor kerül az első helyre. A pálya szintjéhez mért magasság (QFE) szerint kell a talajérintés függőleges sebességét a lehető legkisebbre csökkenteni. Az akusztikus magasságmérő ezen az utolsó néhány méteren szolgál igen fontos adatokkal – ahol centiméterek jelentik a szabályzó kör számára a bemenő jel legkisebb egységét.



4. kép Az akusztikus magasságmérő antennája és adó/vevő berendezése¹¹

Az akusztikus magasságmérő adó/vevő antennája piezoelektromos meghajtású fémmembrán, amelyiket a talaj felé nézve, a motortól minél távolabb, a szárny vagy a törzs megfelelő részére kell felszerelni úgy, hogy semmi ne árnyékolja a talaj felé haladó és a visszaverődő jeleket. Az adóvevő egység a MicroPilot AGL csatlakozóján keresztül kapcsolódik a fedélzeti egységhez – innen kap táplálást és a jelvezeték is ide csatlakozik.

Az akusztikus magasságmérő adatai szerint repül a gép amikor az előre beállított „aglLowThrottleSetting” érték alatt van a tolóerő – ez tipikusan a leszálláshoz közelítve a siklópálya megtörésekor kerül beállításra. Ugyanígy a felszállás előtt is, mindaddig, míg a tolóerő szabályzó a fenti értéket nem éri el.

A MicroPilot robotpilóta egysége a barometrikus magasságot nyomásmérő érzékelő jele alapján számolja – egyeztetve a GPS vevő magassági adataival. A légsebesség mérésére is ugyanilyen érzékelőt alkalmaz – a torló nyomást szilikon csövön bevezetve.

A barometrikus magasságmérő által mutatott nyomás a helyi időjárás változását is követi, ezért időnként kalibrálásra szorul. A GPS-ről vett pillanatnyi magasságadatok ugyan „dobálnak”, de megfelelő szűrő algoritmussal ezek is szinten tarthatók és a referencia jelet innen származtatják – mert az nem időjárásfüggő.

¹¹ A szerzők felvétele



5. kép Az MP2028 alaplapja két nyomásmérő érzékelővel és a GPS vevővel¹²

A MicroPilot robotpilóták ezen kívül a háromdimenziós mágneses érzékelővel, gyorsulásmérővel és gyro stabilizátorral biztosítják a zavarmentes repülést. A PID szabályzókkal minden típusú merev és forgószárnyú repülő eszközre „testre szabott” értékek állíthatók be.

ZÁRÓ GONDOLATOK

A robotrepülőgépeken – mint minden más légi járművön – elsődleges a biztonságos működés – akkor is, ha valamilyen műszaki meghibásodás, vagy akár kezelői hiba éppen ez ellen hat. A redundáns elemek beépítésével a kockázat nagymértékben csökkenthető – mindemellett azt is mérlegelni kell, hogy hol a határ, milyen feladatokra kell feltétlenül alkalmazni.

A robotrepülőgépek fedélzeti és földi egységeinek redundáns elemeire irányuló kutatásainkat a NKE HHK KÜLI Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék UAV laboratóriumában végezzük. A MicroPilot MP2028 alap és kibővített konfigurációja áll rendelkezésünkre, amit többféle hordozón tudunk üzemeltetni. Jelenleg a megfelelő redundáns elemek kiválasztása és összeintegrálása folyik. Ezt követi az autonóm fel- és leszállás, valamint a repülés közben bekövetkező meghibásodások szimulálása és a hazatérés rendszer működésének tesztelése. A tapasztalatokat, eredményeket tudományos fórumokon folyamatosan publikáljuk.

A kutatások és kísérletek a „Repülésbiztonság növelése - madárriasztás robotrepülőgépekkel” témában a



TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások,, A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.”

„The project was realised through the assistance of the European Union, with the co-financing of the European Social Fund.”

Alprogram: Adatintegráció

Kiemelt kutatási terület: A pilóta nélküli Légitűeszközök alkalmazásának Légiközlekedés-biztonsági aspektusai

¹² A szerzők felvétele

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] KOSZTOLÁNYI Tamás, MAKKAY Imre Robotrepülőgépek indító-leszállító berendezései Repüléstudományi Közlemények 2012. április 12.(Kézirat)
- [2] KOVÁCS Gábor, MAKKAY Imre Robotrepülőgépek hasznos terhei Repüléstudományi Közlemények 2012. április 12. .(Kézirat)
- [3] MAKKAY Imre Robotrepülőgépes madárriasztó rendszer Repüléstudományi Közlemények 2012. április 12. .(Kézirat)
- [4] MAKKAY Imre, PAPP Tímea Robotrepülőgépek kommunikációs rendszerei Repüléstudományi Közlemények 2012. április 12. .(Kézirat)
- [5] KUBOVICS Balázs, MAKKAY Imre Robotrepülőgépek magasságmérő rendszerei Repüléstudományi Közlemények 2012. április 12. .(Kézirat)
- [6] <http://lemonodor.com/archives/001391.html>
- [7] <http://www.micropilot.com/>
- [8] <http://www.micropilot.com/products-mp21283x.htm>
- [9] <http://www.micropilot.com/pdf/lrc-drawing.pdf>