

ZRÍNYI MIKLÓS
NEMZETVÉDELMI EGYETEM
Katonai Műszaki Doktori Iskola

Doktori (PhD) értekezés

**A polgári és katonai robotjárművek fejlesztésében alkalmazott új
eljárások és technikai megoldások**

Molnár András

TÉMAVEZETŐ:

Dr. Makkay Imre mk. ezredes
a hadtudomány kandidátusa

Budapest, 2005. szeptember 1.

Tartalomjegyzék

<i>Kutatói hipotézisek</i>	7
<i>A kutatás főbb célkitűzései</i>	8
<i>Kutatási módszerek</i>	9
<i>Kutatómunkám keretei, értekezésem felépítése</i>	10
I. PILÓTA NÉLKÜLI ROBOTREPÜLŐGÉPEK ÉS AZOK INFRASTRUKTÚRÁI	13
1.1. PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐ ESZKÖZÖK.....	13
1.1.1. UAV-k általános jellemzői, kategóriái.....	16
1.1.2. "Dragon Eye" – Naval Research Laboratory [I.7.]	20
1.1.3. FQM-151A „Pointer” – French Armee de Terre [I.8.]	21
1.1.4. „BIODRONE” [I.9.]	22
1.2. SZIMULÁTOROK A PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐESZKÖZÖK KIKÉPZÉSI FELADATAIBAN	23
1.3. TÉRINFORMATIKAI RENDSZEREK ALKALMAZÁSA ROBOTREPÜLŐK ESETÉBEN.....	32
KÖVETKEZTETÉSEK	35
II. KÍSÉRLETI ROBOTREPÜLŐGÉP SÁRKÁNSZERKEZETÉNEK GAZDASÁGOS KIALAKÍTÁSA	36
2.1. SZÁRNYPROFILOK ÉS HATÁSAIK	36
2.1.1. Átesés.....	45
2.1.2. Reynolds-szám.....	46
2.1.3. Szárnyak elcsavarása	49
2.2. STABILITÁS	51
2.2.1. Statikus stabilitás.....	53
2.2.2. Aerodinamikai stabilitás.....	55
2.2.3. A szárny törésének hatása az állásszögre.....	57
2.2.4. Nyomásközéppont vándorlás	58
2.2.5. Lengések kialakulása.....	61
2.3. KÍSÉRLETI ROBOTREPÜLŐGÉP FEJLESZTÉSÉNEK „GYORS PROTOTÍPUS” MÓDSZERE.....	62
2.3.1. Habanyagok alkalmazása a robotrepülőgépek sárkányszerkezetének kialakítására	62
2.3.2. Elektromos hajtás.....	63
2.3.3. Kombinált hajtás a repülés biztonságának növelése érdekében.....	63
2.3.4. Kis hatótávolságú, elektromos felderítő repülő (MANDI-4).....	64
2.3.5. Kis hatótávolságú, elektromos felderítő repülő (REKA1)	69
2.3.6. Közepes hatótávolságú, robbanómotoros robotrepülő (Warrior).....	72
KÖVETKEZTETÉSEK	73
III. NAVIGÁCIÓS ÉS REPÜLÉS-STABILIZÁCIÓS RENDSZER	75
3.1. A GPS RENDSZER JELLEMZŐI.....	75
3.2. TESZTREPÜLÉSEK AZ MP2000 ROBOTPILÓTA EGYSÉGGEL	80

KÖVETKEZTETÉSEK	83
IV. AZ „AEROBOT”, KÍSÉRLETI ROBOTPILOTA EGYSÉG FELÉPÍTÉSE	84
4.1. SZABÁLYZÓKÖRÖK ÁTVITELI FÜGGVÉNYEI	86
4.1.1. Lineáris átviteli függvény	87
4.1.2. Lineáris szakaszokból illesztett átviteli függvény	88
4.1.3. Harmadfokú átviteli függvény	88
4.1.4. Trigonometrikus átviteli függvény	88
4.2. MAGASSÁGTARTÁS	89
4.3. SEBESSÉGTARTÁS	91
4.4. SZIMULÁCIÓ	92
4.5. ÚTVONALTARTÁS	94
4.6. AZ „AEROBOT” KÍSÉRLETI ROBOTPILOTA EGYSÉG MŰKÖDÉSE	96
4.7. KÍSÉRLETI ROBOTAUTÓ	105
4.8. TESZTREPÜLÉSEK	108
4.8.1. Leszállás	110
4.8.2. A magasságtartás beállítása	113
4.8.3. A sebességtartás beállítása	114
4.8.4. A robotegység, mint „fekete doboz”	114
KÖVETKEZTETÉSEK	116
ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	117
ÖSSZEFOGLALÁS	119
JAVASLATOK, AJÁNLÁSOK	119
AZ ÉRTEKEZÉS ÁBRÁINAK, DIAGRAMJAINAK, KÉPEINEK ÉS TÁBLÁZATAINAK	
JEGYZÉKE	120
ÁBRAJEGYZÉK	120
DIAGRAMJEGYZÉK	122
KÉPJEGYZÉK	123
TÁBLÁZATJEGYZÉK	125
FELHASZNÁLT IRODALOM	126
PUBLIKÁCIÓIM	129
<i>Hivatkozások publikációimra</i>	<i>129</i>
<i>Nemzetközi konferenciák proceedings-eiben megjelent közlemények:</i>	<i>129</i>
<i>Hazai folyóiratban megjelent közlemény:</i>	<i>130</i>
<i>Hazai konferenciák proceedings-eiben megjelent közlemények:</i>	<i>130</i>

Bevezetés

Az elmúlt évtizedekben rendkívül nagyarányú technikai fejlődés volt megfigyelhető a világ fejlett államaiban. Ez különösen szembetűnő a vezető nagyhatalmak esetében. A fejlődés jellegét tekintve két fő vonulat határozható meg:

- Új elvek alapján kifejlesztett eszközök.
Ilyenek például a GPS rendszer, vagy a mobil kommunikációs hálózat, vagy a bináris számítógépek.
- Az új rendszerek által biztosított lehetőségek összehangolásából, speciális alkalmazásaikból létrehozott új rendszerek.
Ilyenek például a mobiltelefonok helyének bemérésére visszavezetett helymeghatározó rendszer, a GPS rendszerekhez kifejlesztett navigációs rendszerek.

Meg kell említeni a fejlődés egy merőben új irányát. A szoftverek fejlesztése egy új paradigmát vezet be a mérnöki és a tudományos kutatások fogalmkörébe. A szoftverek jellegükből adódóan könnyen másolhatóak, sokszorosíthatóak, így nehéz védeni, ugyanakkor napjainkra szinte minden elektronikai rendszer nélkülözhetetlen részét képezik. **A digitális rendszerek jellegéből adódóan az eszközökbe integrált szoftver az eszköz alkalmazhatósága szempontjából meghatározó!**

A különféle fejlesztések mind civil, mind katonai területen új eredményeket hoznak. A modern rendszerek nagyobb biztonságot, pontosságot, megbízhatóságot nyújtanak. Vannak azonban olyan fejlesztések, melyek segítségével új, az eddigi rendszerekkel megoldhatatlan feladatok ellátását biztosítják.

Az idegen hadseregek technikai elemzéseit követve kirajzolódik egy trend, mely a gépesítés jelentős növekedését mutatja. A modern számítástechnikai, valamint a hozzá szorosan kapcsolódó mesterséges intelligencia kutatások eredményei lehetővé teszik azok alkalmazását a modern hadviselésben. Az elmúlt évtized jelentős fejlődést mutatott az információátvitel terén, ide értve a műholdas, celluláris, valamint internetes hírközlést. A számítástechnika megjelenése a mérés technikában és az irányítástechnikában szintén szembeötlő.

Ezen eredményeknek köszönhetően megjelentek az intelligens robotok. Az intelligens robotok kutatása nagy erővel folyik mind a polgári kutatások, mind a hadi kutatások terén. Már a II. Világháborúban Németország sorozatban gyártott a kor technikai színvonalának megfelelő robotrepülőgépeket (V1). A robotok kutatását és alkalmazását feltérképezve láthatóvá válik, hogy sok esetben már sikerrel alkalmaztak ilyen eszközöket. Ezek közös jellemzője, hogy működtetésük távolról történik (Góliát), így a kezelő nincs közvetlen életveszélyben.

Békeidőben gyakori feladat katasztrófhelyszínek feltérképezése, élet- és vagyonmentés. Az elmúlt időszakban, több esetben volt példa robotok vagy félautomata távirányítású eszközök bevetésére.

A számítástechnika rohamos fejlődésének köszönhetően várható, hogy a közeljövőben a robotika témakörében jelentős előrelépések történnek. Ennek ma mind műszaki, mind elméleti alapja adott.

Napjainkban ugyanakkor jól látható, hogy a technikai fejlődés nem egyedüli feltétele a roboteszközök elterjedésének. Minden robotfejlesztéssel és üzemeltetéssel foglalkozó ország egyik jelentős problémája a már meglévő eszközök üzemeltetésének jogi és biztonsági kérdéseinek tisztázása!

Az üzemeltetési biztonság kérdése szembetűnően a robotrepülőgépek¹ esetében a legégetőbb, bár hasonló problémák fogalmazódnak meg egyéb, távirányított, illetve autonóm eszközök esetében is.

A robotrepülőök üzemeltetésével kapcsolatosan az alábbi megoldandó kérdések kerültek előtérbe:

- Az üzemeltetés során bekövetkező esetleges rendszer**hiba esetén okozott** másodlagos **károk** (harmadik személynek okozott anyagi és személyi sérülések) **kezelése, megelőzése.**
- **Nem pilóta által vezetett légi járművek üzemeltetése szabad** (nem speciálisan korlátozott) **légterekben** [12, 13, 14].

Az esetlegesen okozott károk, illetve sérülések csökkentésének érdekében jelen gyakorlat az üzemeltetési terület korlátozása. A korlátozás azonban éppen a pilóta nélküli repülőgépek egyik jelentős előnyétől fosztja meg a felhasználót, mivel továbbra sem

¹ Az értekezésben a pilóta nélküli repülőgép, a robotrepülőgép, valamint az UAV (Unmanned Aerial Vehicle), mint szinonim kifejezések jelennek meg.

vethetők be ilyen eszközök veszélyes üzemek, iparterületek vagy sűrűn lakott települések felett. **A pilóta nélküli repülőgépekkel okozott károk kockázatának jelentős csökkentése a kutatások egyik kiemelt területe.**

A légtérhasználat kérdése szintén megoldatlan feladat. A nagy hatótávolságú robotrepülőgépek esetében számításba kell venni, hogy a jármű a polgári repülésben használt különféle besorolású (ellenőrzött és nem ellenőrzött) légtereket is használhatja.

Az ellenőrzött légterek igénybevételéhez jelen pillanatban a robotrepülőgépnek rendelkeznie kell válasz-jeladóval (transzponder), valamint a légügyi hatóságoknál engedélyezett repülési tervvel. Ugyanakkor nem tisztázott, hogy a légi közlekedést felügyelő szerv által kiadott utasításokat a robotrepülőgép miként hajtja végre, illetve az utasítás „tudomásul vétele” miként történhet.

A nem ellenőrzött légtér használata során a helyzet súlyosabb, mivel a vonatkozó szabályok értelmében a jármű pilótája köteles a környezete forgalmát figyelemmel kísérni és a mindenkori helyzetnek megfelelően változtatni a repülési paramétereken. Ebben az esetben **alapvető probléma az, hogy egy pilóta nem tudhatja, hogy az általa használt légtérben nem pilóta által vezetett légi járművel találkozott.**

Az üzemeltetési problémák megoldására nemzetközi szakmai fórumok próbálnak választ adni.

A fejlesztéssel foglalkozó országok, illetve szervezetek felé **elvárás az igényeket legjobban kielégítő prototípusok gyors kifejlesztése** és hatékony tesztelése. A fejlesztés során szükség van olyan új építési eljárások alkalmazására, melyek biztosítják a prototípus olcsó és gyors előállíthatóságát. Sok fejlesztő szervezet rugalmatlanságát az okozza, hogy a „hagyományos” repülőgépgyártásból átvett építési technológia magas költsége nem teszi lehetővé nagyszámú, működőképes prototípus megépítését. Ezen a területen **jelentős változást hozhat az alacsony költségű, gyors és rugalmas prototípus gyártási technológiák bevezetése.**

A harci repülőgépek számítástechnikai rendszerei egyre fejlettebbek. Ezek a rendszerek szinte minden hagyományos repülőgép vezetési feladatot elvégeznek, így a pilótának több ideje marad a repülési feladat végrehajtásának elvégzésére (célok felderítése, megsemmisítése, egyéb harci feladatok ellátása). A repülőgépek automatizálása eljutott arra a szintre, hogy a pilóta személye gátolja a repülőgép képességeinek maradéktalan kihasználhatóságát (a repülőgép szerkezete nagyobb terheléseket visel el, mint az emberi szervezet). **A nemzetközi, valamint a hazai kutatási és fejlesztési trendek**

azt mutatják, hogy a közeljövőben a hagyományos (pilóta által vezetett) repülőgépeket robotrepülőgépek fogják leváltani.

A fenti, rövid elemzés alapján megállapítható, hogy a jelzett téma kutatása időszerű, és hasznos eredményekkel zárulhat. Elmondható, hogy a robotkutatás minden haderő, valamint védelmi szerv érdeke, akár önmaga óhajt kifejleszteni ilyen eszközt, akár más államoktól kíván vásárolni.

Kutatói hipotézisek

Kutatásaim alapvetően az autonóm és félautonóm eszközök felé irányultak. A rendelkezésemre álló idő és terjedelmi korlátok miatt, természetesen a teljes terület elemzését nem vállalhattam fel. Kutatási tevékenységemet a pilóta nélküli repülőgépek témakörére összpontosítottam, de igyekeztem ajánlásokat tenni olyan megoldásokra, melyek egységesen alkalmazhatók egyéb (pl.: vízi és szárazföldi) eszközök vezérlésére is.

Kutatói, fejlesztői munkámat az alábbi hipotéziseim határozták meg:

- A napjainkban rendszerben álló, vagy rendszerbeállítás előtt álló robotrepülőgépek beszerzési ára igen magas, ugyanakkor felhasználási területük jelentősen típus specifikus. **A fejlesztési irányelvek és módszerek megfelelő kidolgozása csökkenti a fejlesztés során szükséges technológiai költségeket.** Ennek következtében a kifejlesztett robotrepülőgépek indulási ára is alacsonyabb lehet, lehetőséget biztosítva a szélesebb körben történő felhasználásukra.
- A modern szabályzó rendszerek (robotrendszerek) igen komplex, a kor szabályzástechnikai irányelveit tükröző kezelése megköveteli a magasan kvalifikált kezelőszemélyzetet. Ugyanakkor a haderő számos területén igény lenne olcsó és egyszerűen kezelhető robotrepülőre, mely segítségével egy közepesen képzett személyzet, vagy akár egyetlen ember is képes helyi feladatokat (pl.: közeli felderítések) ellátni. **A „felhasználói, alkalmazói” szemléletű vezérlőrendszer kidolgozása gyorsítja a robotrepülőgépek gyakorlati felhasználását.** Mindez ugyanakkor eleget tesz a repülőgép vezetéséhez szükséges feltételeknek, miközben a hagyományos rendszerekkel ellentétben kezelői felülete egyszerű, a beviteli adatok rendszere, szerkezete nem technikai, hanem felhasználói szemléletet tükröz.

- A robotrepülőgépek üzemeltetése kockázatokkal jár. Az esetleges meghibásodások során okozott kár az igénybe vett térségtől (a robotrepülőgép becsapódása veszélyes ipar- vagy gyár-, illetve sűrűn lakott területekre stb.), valamint a repülőgép méreteitől, felépítésétől függ. **Speciális hajtáslánc alkalmazása csökkenti a robotrepülőök üzemeltetési kockázatát.**

A kutatás főbb célkitűzései

A kutatási munkám átláthatósága, valamint könnyebb kezelhetősége érdekében meghatároztam azokat a főbb célokat, melyeket szeretnék elérni. Noha a célok meghatározása nem determinálja azok elérését, mégis a kutatás során számos esetben segített meghatároznom munkám pillanatnyi állapotát, előrehaladtának mértékét.

Tudományos munkámban az alábbi célokat jelöltem meg:

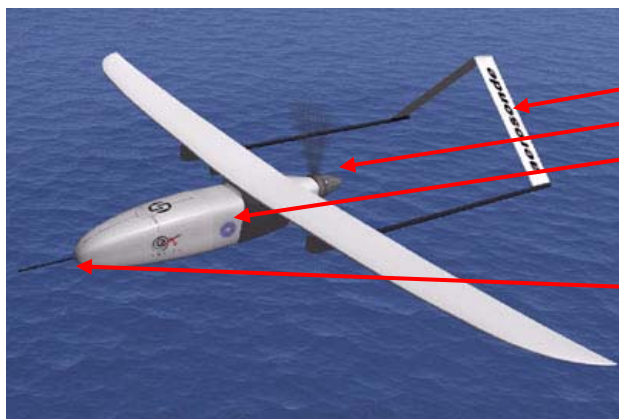
- Meghatározni azokat a mechanikai, aerodinamikai és repüléstechnikai összefüggéseket, melyek ismeretében a legmegfelelőbb robotrepülő konstrukciók megtervezése lehetséges.
- Meghatározni azokat a robotrepülőgépek szabályzóköreiben alkalmazható átviteli függvényeket, melyek jól illeszkednek a korszerű számítástechnikai képességekhez (kapacitásokhoz), ugyanakkor a szabályzás szempontjából megfelelő karakterisztikával rendelkeznek.
- Megtervezni és megvalósítani egy komplex robotirányítású egységet, mely rugalmasan alkalmazható különféle – kisméretű – földi és légi járművekben.
- Meghatározni egy olyan robotrepülőgép építési technológiát, mely segítségével olcsón és gyorsan lehet kísérleti repülőgépeket készíteni, így megkönnyíteni azok kutatását, fejlesztését.
- Megtervezni és megépíteni olyan, pilóta nélküli repülőgépet, mely meghibásodása esetén sem okoz jelentős anyagi kárt, vagy személyi sérülést.
- Az általam meghatározott elvek és összefüggések igazolása céljából megépíteni néhány demonstrációs célú pilóta nélküli repülőgépet, melyek segítségével lehetőség nyílik a különféle újszerű képességek (pl.: költségkímélő légi felderítés, gyors elemzés, küldemények nagypontosságú célba juttatása stb.) bemutatására.

Kutatási módszerek

A kitűzött kutatási céljaim elérése érdekében az alábbi, főbb kutatási módszereket alkalmaztam:

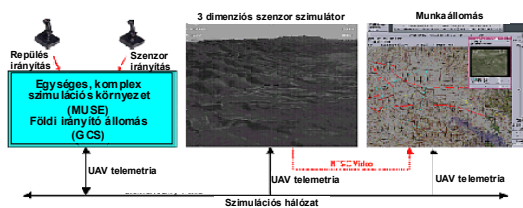
- **Tanulmányi tervet állítottam össze** úgy, hogy a kötelező és választott tantárgyak, kutatói szemináriumok a lehető legjobban támogassák tudományos célkitűzéseim elérését.
- **Tanulmányoztam** a témával kapcsolatos külföldi és hazai szakirodalmak vonatkozó fejezeteit, a megjelent kiadványokat, tanulmányokat, valamint a legfrissebb kutatások eredményeit, ajánlásait.
- **Részt vettem nemzetközi és hazai szakmai fórumokon, konferenciákon**, ahol előadásokat tartottam, emellett tapasztalatokat gyűjtöttem, eszmecserét folytattam más kutatókkal, fejlesztőkkel.
- **Ismereteket szereztem** más államok robotrepülőkkel kapcsolatos tapasztalatairól, elméleti és gyakorlati eredményeiről.
- **Konzultáltam** potenciális hazai felhasználókkal, felmértem, összegeztem igényeiket és elképzeléseiket.
- **Konzultációkat kezdeményeztem** a téma szűkebb szakterületeit képviselő kutatókkal, szakemberekkel.
- **Célirányos kereséseket folytattam** könyvtárakban, valamint számítógépes hálózatokon fellelhető adatbázisokban.
- **Rendszereztem** eddigi pályafutásom alatt szerzett tudásomat és aktív pilótaként szerzett tapasztalataimat.
- **Szimulációs modellezést végeztem**, ezen adatok alapján elkészíthettem kísérleti eszközeimet.
- **Kísérleteket folytattam** le egy-egy részfeladat eredményeinek igazolása, pontosítása érdekében.

Kutatási témám egy komplex rendszert ölel át. Az egyes alrendszerek kifejlesztése során a teljes rendszer ismerete elengedhetetlenül szükséges. Az 1. ábra a robotrepülő rendszer vázlatos részeit szemlélteti. Ezen az ábrán látható főbb részek megnevezései illeszkednek a szakirodalomban, valamint a dolgozatomban szereplő kifejezésekhez, megfogalmazásokhoz.



A robotrepülőgép általános felépítése

- Sárkány
- Hajtómű
- Fedélzeti elektronika
 - o Repülésbiztosító
 - o Navigációs
 - o Kommunikációs
- Telemetria
- Földi irányítás
 - o Repülőgép irányító (pilóta)
 - o Felderítő, kiértékelő
 - o Repülésirányító



1. ábra: A robotrepülőgép általános felépítése²

A 2. ábra³ áttekintést nyújt azokról a területekről, melyekkel részletesen foglalkoztam. Az ábrában **piros kerettel jelöltem** azokat a területeket, melyekben kutatásaim során **új tudományos eredményeket** alkottam.

Kutatásaim részeredményeit szakmai kiadványokban rendszeresen publikáltam. Nemzetközi és hazai szakmai fórumokon és konferenciákon rendszeresen tartottam előadásokat az általam végzett munkákról és azok eredményeiről. Előadásaim és publikációim visszhangjait, reflexióit felhasználtam az eredményeim értékelése során.

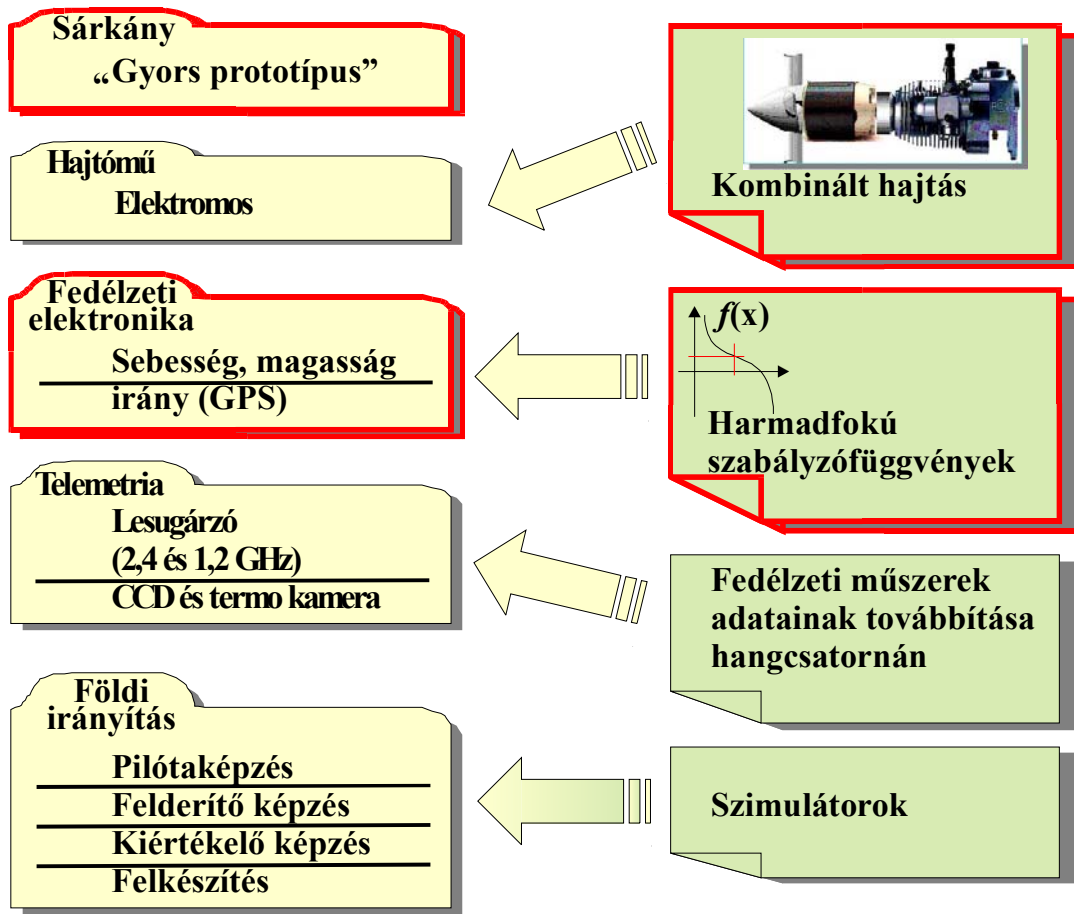
Kutatómunkám keretei, értekezésem felépítése

Értekezésem a terjedelem korlátozása következtében azokkal a legfontosabb elvek és összefüggések ismertetésével foglalkozik, melyek feltétlenül szükségesek a következtetésem egyértelmű meghatározásához. Az általam választott téma számos olyan kapcsolódó területet érint, melyek akár önálló értekezés tárgyát is képezhetnék. A

² Az ábrát az I9, és a 6. szakirodalmakban szereplő képek felhasználásával készítette Molnár András.

³ Az ábrát készítette Molnár András.

korlátozott terjedelem miatt – noha számos témával behatóan foglalkoztam – egyes területekre csak utalni tudok.



2. ábra: A kutatási tevékenységem főbb területei, kiemelve az új tudományos eredményeim területeit

Értekezésemet négy fő fejezetre tagoltam.

Az első fejezetben bemutatom a modern pilóta nélküli repülőgépek főbb jellemzőit, valamint a fejlesztésükhöz és üzemeltetésükhöz szükséges háttérket. Az ismertetés célja, hogy rámutassak azokra a fejlesztési és kutatási területekre, melyek napjainkban a téma ismert határát képezik.

A második fejezetben részletesen elemzem a robotrepülőgépek tervezésének elméleti kérdéseit. Gyors építési technológiát dolgozok ki robotrepülőgép prototípusok készítésére. Az elemzés célja, hogy megtaláljam azokat a fő aerodinamikai jellemzőket és prototípusgyártási eljárásokat, melyek biztosítják a robotrepülőkhöz tervezett repülésstabilizáló és útvonalkövető elektronika képességeihez leginkább illeszkedő sárkányszerkezetet.

A harmadik fejezetben kísérleti mérésekkel határozom meg a fedélzeti robotrendszerhez használt GPS készülékek pontosságát, megbízhatóságát, illetve felhasználásának feltételeit. A kísérletek célja, hogy megtervezem és elkészítsem a robotpilóta rendszert.

A negyedik fejezetben bemutatom az általam kifejlesztett robotrendszert. Kísérletekkel igazolom a rendszer egyes egységeinek működését, valamint bemutatom a fejlesztés várható további menetét.

Amint az értekezésből is látható, annak megírásával kutató tevékenységem nem ér véget. Kutatómunkám során számos olyan területet találtam, ahol a további vizsgálatok, kísérletek újabb eredményeket szülhetnek. A robotrepülőök gyakorlati alkalmazása napjainkban egyre erősödő tendencia, ezért munkámat tovább folytatva keresem azokat az utakat, melyek elősegítik a hazai robotrepülőgép fejlesztést, gyártást és felhasználást.

I. Pilóta nélküli robotrepülőgépek és azok infrastruktúrái

A pilóta nélküli repülő eszközökről csakis a teljes rendszeren keresztül történő vizsgálat adhat átfogó képet. Ebben a fejezetben ismertetésre kerülnek azok a főbb területek, melyek egy robotrepülőgépet üzemeltető egység elengedhetetlen részeit képezik.

1.1. Pilóta nélküli repülő eszközök

Már a II. Világháborúban felmerült igény pilóta nélküli repülő eszközökre. Ennek elsődleges oka az volt, hogy nem állt rendelkezésre elegendő pilóta. A háború során eleinte gyors pilótaképzéssel próbálták a problémát orvosolni. A technikai színvonal azonban már lehetőséget biztosított olyan repülőeszköz megtervezésére, amely egy előre meghatározott pályán képes végigrepülni, majd bombaterhével a célba csapódni. A német fejlesztésű „V1” repülőbomba a mai értelemben egy igen kezdetleges robotrepülő volt. Még nem volt képes visszatérni, és repülése során sem tudott pályakorrekciókat végrehajtani, de rendelkezett inerciális repülésstabilizáló rendszerrel, mely alkalmas volt a légköri zavarok által okozott eltérések korrigálására.

A háború után a robotrepülőgépek fejlesztése új irányokat vett.

A polgári repülésben a fő célok között a pilóta terhelésének csökkentése, pilótahibák kiküszöbölése, valamint a személyzet létszámának csökkentése állt. Napjainkra jellemző, hogy a repülések jelentős hányada úgynevezett műszeres repülés. Ez azt jelenti, hogy a repülőgép vezetése kizárólag a fedélzeti műszerek adatai alapján történik, mivel a repülés minden jellemzőjét műszerek érzékelik. Szükségszerűen megjelennek olyan rendszerek, melyek az egyes műszerek jeleit egy szabályzó segítségével feldolgozzák és elvégzik a megfelelő beavatkozásokat.

A pilóta nélküli repülőgépek megjelenése a technikai fejlődés elkerülhetetlen következménye. Mivel a repülőgépek vezetése egyre több feladatot rótt a pilótákra, a konstruktőrök igyekeztek a biztonság növelése érdekében különféle, repülést elősegítő berendezéseket kifejleszteni, illetve alkalmazni. A fedélzeti elektronikai eszközök fejlődése jól megfigyelhető a közforgalmi repülésben. Például az AN-24 típusú szállító repülőgép személyzete öt fő (pilóta, másodpilóta, navigátor, rádiós, fedélzeti mérnök). A kicsivel nagyobb kapacitású Fokker-70 személyzete két fő (pilóta, másodpilóta). A Fokker-70 esetében igen fejlett a fedélzeti elektronika, így a két pilóta képes ellátni

mindazt a feladatot, amit az AN-24 esetében öt fő végez! Valójában a mai fedélzeti számítógépek a földi kiszolgálórendszerekkel együttműködve képesek a repülőgépeket automatikusan vezetni, sőt egyes esetekben még magát a leszállást is végrehajtani.

A harci repülőgépekkel szemben támasztott manőverezési képességek javítása olyan konstrukciók fejlesztését követelte, amit a hagyományosan stabilitásra tervezett sárkányszerkezetek nem voltak képesek teljesíteni. Az alapvetően instabil repülőszerkezetek vezetése már hagyományos módon nem volt kielégítő, így a stabilitást másodlagos kormányfelületekkel és azok számítógépes vezérlésével oldották meg a tervezők. A legfejlettebb harci repülőgépek vezetése gyakorlatilag a számítógépnek adott utasításokon keresztül történik. Valójában a számítógép vezeti a repülőt, a pilóta „csupán” utasítja az egyes manőverek végrehajtására. Erre azért van szükség, mert a katonai repülőgép pilótájának feladata nem kizárólag a repülés, hanem a harcászati feladat végrehajtása is! A pilóta akkor képes nagy bonyolultságú és pontosságú tevékenységet folytatni, ha a figyelmét nem kell megosztani egyéb (repülési) feladatokkal. A számítógép elsődleges feladata tehát, hogy a repülőgép pilótáját a lehető legnagyobb mértékben mentesítse a rutinfeladatokról (mint például a repülőgép vezetése), ezáltal biztosítva a fő feladat (harci cselekmény) leghatékonyabb végrehajtását. A technika fejlődése napjainkban elérte azt a szintet, hogy a repülőgép szerkezeti és repülési határértékei meghaladják az emberi szervezet teherbíró képességét. Mivel a gyorsabb, jobb manőverező képességgel rendelkező repülőgép használatának emberi korlátai vannak, szükségszerű a pilóta elhagyása!

A fenti fejlődési vonulat felismerése azért lényeges, mert lehetőséget biztosít a fejlődés rövid és középtávú prognózisára. Mára már több külföldi és hazai politikus is úgy nyilatkozik, hogy a jövő hadseregeiben a pilóta által vezetett harci repülőgépeket a robotrepülőgépek fogják felváltani.

A fentiek alapján magyarázható, hogy az elmúlt évtizedekben fejlesztett, rendszerben lévő robotrepülőgépek méretei még hasonlítanak egy hagyományos, ember vezette repülőgép méreteire. Érdekes azonban a robotrepülőgépek fejlesztésének egy másik vonulatát is megvizsgálni.

Bár a repülőmodellezés majdnem egyidős a repüléssel, a rádió távirányításúak csak a technikai fejlődés egy viszonylag magas fokán jelentek meg. Ezek a modellek sokáig csupán hobbi, valamint sporteszközök voltak. Napjainkra válik világossá, hogy különféle

szenzorokkal felszerelve **a repülőmodell már távirányított szenzorként alkalmazható!** Természetesen ez is a technika fejlődésének köszönhető. Az elmúlt évtizedekben elérhetővé váltak a kompozit⁴ szerkezeti anyagok, megjelentek a kistömegű, de nagy teljesítményű belsőégésű motorok. Már kaphatók nagy kapacitású és könnyű akkumulátorok⁵, melyek kisméretű és nagy teljesítményű villanymotorok meghajtására képesek. A mikroelektronikának köszönhetően a kisméretű, nagy érzékenységgű rádió távirányító berendezések kerültek piacra.

Ezen fejlemények vezettek számos mai konstruktórt olyan robotrepülőgépek megalkotására, melyek méretei és repülési képességei már jelentősen eltérnek a pilóták által vezetett repülőgépektől.

A robotrepülőgépek megjelenése és elterjedése **új feladatokat jelent** azok üzemeltetői számára. Részben **a kezelőszemélyzet kiképzése**, részben **az üzemeltetési körülmények jelentős megváltozása** folytán új munkahelyek és az eddigiektől eltérő infrastruktúrák igénye merült fel. A robotrepülőgép vezetők kiképzése során hatékonyan alkalmazhatók a szimulátorok. A szimulációs környezet – akár teljes egészében – megegyezhet a későbbi munkahellyel, ezért a robotrepülőgép szimulátorokkal végzett kiképzés hatékonysága igen magas.

A robotrepülőgép kiszolgálása is jelentősen eltér a hagyományos repülőgépek esetében megszokottól. Mivel a repülőgép egy nagy bonyolultságú távirányított szenzorrendszernek tekinthető, a földi lépcső üzemeltetése is főként az adatátvitel és adatfeldolgozás területén jártas személyzetet kíván meg. Az adatfeldolgozás két fő feladatra bontható szét. Az egyik a repülési adatok biztosítása a robotrepülőgép vezetője számára⁶, a másik a szenzorok által szolgáltatott információk vizuális megjelenítése. Itt alapvető igény, hogy a mért, felderített információk olyan formában jelenjenek meg, hogy azok földrajzi elhelyezkedése a lehető legjobban értelmezhető, látható legyen. Ennek tesznek eleget a modern térinformatikai rendszerek, melyek nemcsak háromdimenziós térképmodellekkel, hanem speciális, réteges⁷ megjelenítési lehetőséggel is képesek az információk valós idejű ábrázolására.

⁴ Kompozit anyagok alatt itt a műgyantával átitatott üveg, illetve szénszálas anyagokat értem.

⁵ Az elmúlt években megjelentek és rohamosan fejlődnek a NiCd, a NiMh, valamint a Li-poly akkumulátorok.

⁶ A virtuális pilótafülke műszereinek adatait a repülőgépen elhelyezett szenzorok érzékelik. Ezek az adatok biztosítják a kezelő részére az irányításba történő beavatkozás lehetőségét.

⁷ A jobb áttekinthetőség érdekében a modern térinformatikai rendszerek lehetőséget biztosítanak a térképek olyan megjelenítésére, ahol csak a feladat végrehajtása szempontjából lényeges információk kerülnek ábrázolásra.

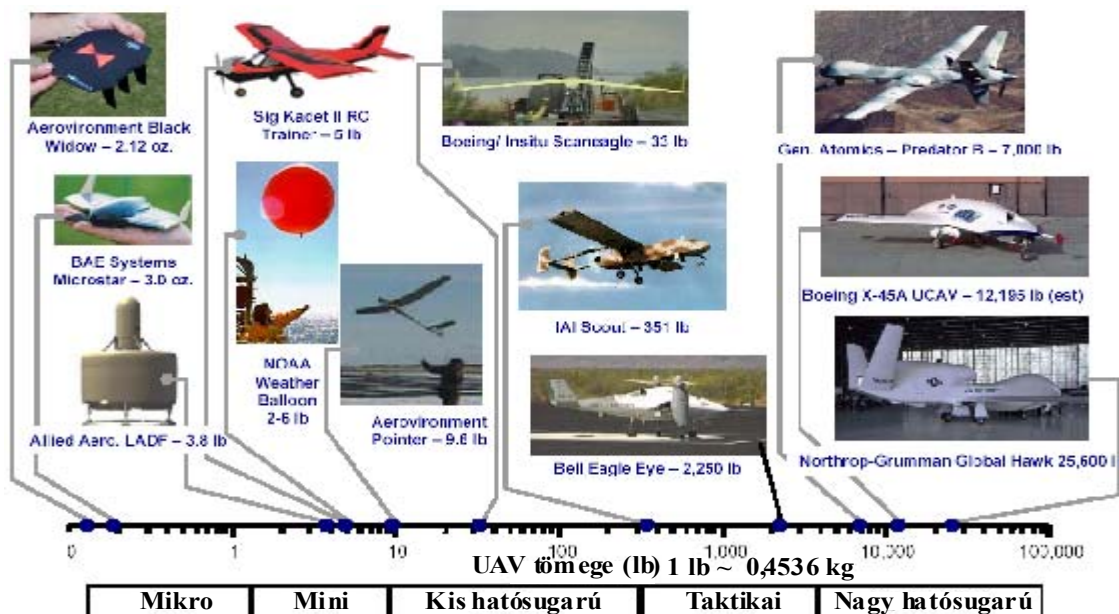
A pilóta nélküli repülőgépek képességei jelentősen eltérnek egymástól. A konstruktőrök igyekeznek eleget tenni a felhasználói igényeknek, melyek kielégítése összetett feladat [11]. A rendszerbeállított, illetve kísérleti robotrepülőgépeket különféle szempontrendszer szerint lehet csoportosítani.

1.1.1. UAV-k általános jellemzői, kategóriái

Az UAV-k csoportosításának célja, hogy összehasonlítási lehetőséget biztosítson az egyes géptípusok között. Az egyes kategóriákba sorolást önkényesen megválasztott szempontok, vagy szempontrendszerek szerint lehet elvégezni. Ilyen szempontok lehetnek:

- a robotrepülő fizikai mérete, üzemeltetéséhez szükséges repülőtér mérete, jellege,
- alkalmazási területek, hatótávolság, szolgálati magasság,
- a szállítható hasznos teher mennyisége,
- az alkalmazott építési technológia,
- a meghajtás módja,
- a robotrepülő üzemeltetési költsége, ár/teljesítmény aránya.

Az 1.1. ábra a „Safety Considerations for Operation of Small Unmanned Aerial Vehicles in Civil Airspace” című, 2004-ben tartott konferencián [17] bemutatott UAV-k tömeg és képesség szerinti csoportosítása látható. Az ábrában szereplő UAV típusok a teljesség igénye nélkül, példaként lettek feltüntetve.



1.1. ábra: Az UAV-k tömeg és képesség szerinti csoportosítása⁸

⁸ Forrás: http://icat-server.mit.edu/Library/Download/2005_Weibel%20R%20-%20Sefety%20Considera.pdf (2005. január). Magyar feliratokat készítette Molnár András.

Kutatási témáim egyik jelentős része a „gyors prototípus technológia” kifejlesztéséhez kapcsolódik. **Az UAV-kat a fejlesztési megközelítések alapján az alábbi három kategóriába soroltam:**

- a) Hagyományos, **pilóták által vezetett gépek alapján konstruált**, „fentről lefelé építkezés” elvét követő tervezéssel megvalósított robotrepülőgépek.
 - b) Kisméretű **modellek alapján konstruált**, „lentől felfelé építkezés” elvét követő tervezéssel megvalósított robotrepülőgépek.
 - c) **Mikro méretű**, új aerodinamikai elvek felhasználásával konstruált robotrepülőgépek.
- a) **Az UAV-k fejlesztésének egyik lehetséges módja az úgynevezett „fentről lefelé építkezés”.** Ennek lényege, hogy a fejlesztés alapját egy hagyományos repülőeszköz alkotja, melyet megfelelő elektronikai rendszerekkel tesznek alkalmassá pilóta nélküli üzemeltetésre. Ennek a módszernek egyértelmű előnye, hogy a repülőgép viselkedése, repülési képessége jól megismerhető. Az elektronikai rendszerek működése valós körülmények között könnyen tesztelhető. A kísérleti repülések kezdeti szakaszában az UAV fedélzetén berepülőpilóta tartózkodhat, aki bármilyen rendszerhiba vagy bizonytalanság esetén átveheti a gép vezetését. A berepülőpilóta tapasztalataival hasznos segítséget nyújt a fejlesztőknek, illetve a tesztrepülések további szakaszában egy földi központból képes az UAV irányítására.

Az így kifejlesztett UAV-kra jellemző, hogy méreteik és repülési képességeik nagyon hasonlóak a hagyományos, ember vezette repülőgépekhez. Ebből következik, hogy az UAV irányítását a repülésben elterjedt hasonló szimulátorokkal lehet gyakoroltatni.

- b) **Az UAV-k fejlesztésének egy másik – és napjainkban egyre gyakoribb – módja a „lentől felfelé építkezés”.** Ez azt jelenti, hogy az UAV fejlesztésének alapjául egy viszonylag kisméretű repülőeszköz szolgál. Ennek méreteinél fogva az irányítása is csak „kívülről”, távirányítással lehetséges, így a fejlesztés során minden adatot kizárólag szélcsatorna kísérletekből, illetve a fedélzeti adatrögzítőkkel lehet megszerezni. A gép vezetése eltérő ismereteket igényel a hagyományos repülőkhöz képest. A speciálisan kiképzett személyzet tréningjét, illetve új kezelők kiképzését speciális szimulátorokkal hatékonyan lehet végezni.

c) A mikroelektronika rohamos fejlődésének köszönhetően **megjelentek** – napjainkban még csak kísérleti jelleggel – **a mikro UAV-k** [15]. Ezek mérete 10-20 cm vagy még ettől is kisebb és tömegük is csekély (néhányszor 10 gramm). A mikro UAV-k fejlesztése lényegesen eltér a hagyományos UAV-k fejlesztési mechanizmusaitól. Ennek oka a kis méretben és a kis tömegben található. A modern, kompozit (üvegszál, szénaszál) szerkezeti anyagok rendkívül nagy mechanikai szilárdságot biztosítanak viszonylag kis tömeg mellett. Ennek köszönhetően a 10-20 cm-es repülő szerkezetek általában akkor sem sérülnek meg, ha 1-2 méter magasságból lezuhannak. Így a repülésben kritikusnak számító leszállás, mikro UAV-k esetében elhanyagolható kockázatú manővernek számít. **A mikro UAV-t vezető pilóta fő feladata** tehát nem a fel- és leszállás precíz kivitelezése, hanem **a hagyományos repülésben szokatlan manőverek (szűk fordulók, zárt térben történő repülés stb.) elsajátítása** lesz. Ezek gyakorlását, tanulását szimulátorok segítségével rendkívül hatékonyan meg lehet oldani.

A kisméretű UAV-k új, a hagyományos repülőktől eltérő feladatok megoldására is alkalmasak. Ennek okai összetettek.

- A kis méret és tömeg, valamint a viszonylag nagy motorteljesítmény kedvező manőverezési képességet biztosít. Lehetővé válnak rendkívül kis magasságú repülési feladatok végrehajtásai, valamint olyan repülési pályák lekövetései, melyek rendkívül precíz felderítést vagy célba juttatást biztosítanak.
- A hagyományos repülőknél jóval kisebb hajtóművek lényegesen nagyobb dinamizmussal rendelkeznek, ami tovább növeli a kisméretű UAV-k mozgékonyágát.
- Sok esetben a kisméretű UAV-k részére repülőtérre sincs szükség. A startot általában valamilyen katapult szerkezet segíti, a leszállást pedig, vagy egy rövid füves területen hajtják végre, vagy hálóval, esetleg más befogószerkezettel végzik.
- A mikro UAV-k fejlesztésének egyik fő irányvonala az egyszer használható repülőgép. Noha a kis méretek csúcstechnológiát feltételeznek, mégis a gépek sorozatgyártása esetében az előállítási költséget le lehet szorítani annyira, hogy a géppel szerzett információ értéke nagyságrendben illeszkedjen az eszköz értékéhez.

A „lentől felfelé” építkezés legjobb példái az elektromos hajtású UAV-k. Az elektromotorok, valamint a nagyáramú akkumulátorok, az elmúlt években kezdődött, és még napjainkban is tartó jelentős fejlesztése lehetővé tette az elektromos hajtású repülőgépek megjelenését. Napjainkban az elektromotorok, és az őket energiával ellátó akkumulátorok súly-teljesítmény aránya már olyan kedvező, hogy az elektromotoros kisrepülőgépek valós hordozói lehetnek különféle szenzoroknak, illetve műszereknek. Mivel az elektromos kisrepülőök üzemeltetése lényegesen csendesebb, mint a robbanómotorosoké, a világon több neves kutatóhely figyelmét felkeltette. Számos olyan alkalmazás létezik, ahol előnyt jelent az alacsony zajszint és az egyszerű üzemeltetés. Az elektromos hajtás további előnye, hogy a motorok leállítása, újraindítása a levegőben semmilyen problémát nem okoz. Napjainkban még a hagyományos, belsőégésű motorokkal hajtott robotrepülőök hatótávolsága, teherbírása lényegesen túlszárnyalja az elektromos gépekét. Ugyanakkor **számos feladat létezik, ahol az 50-100 perces bevetési idővel rendelkező, és az 500-1000 gramm hasznos tömeg szállítására képes elektromos robotrepülő gazdaságosabban üzemeltethető.**

Új lendületet jelent az elektromos hajtás elterjedésében két tényező:

- Egyre elterjedtebbek és folyamatos fejlesztés alatt állnak az úgynevezett „brushless”, azaz szénkefe nélküli elektromotorok. Ezek lényegében egyenáramú motorok. A kommutátort egy speciális szabályzó helyettesíti, amely képes a forgás mindenkori pillanatának megfelelően az elektromotor tekercseibe áramot kapcsolni. A motor előnye, hogy elektromos hatásfoka 80%, vagy esetenként még magasabb is lehet, a nyomatéka pedig, a tekercsek számával jól méretezhető.
- Megjelentek és hamar teret hódítottak a Lithium-polymer (Li-Po) akkumulátorok. Ezek az akkumulátorok a Lithium-ion akkumulátorokkal szemben lényegesen magasabb kisütő áramot is elviselnek (7-10 C⁹), ugyanakkor kis tömegűek és nagy kapacitásúak. Mivel a kisütési állapottól függetlenül tetszőleges időpontban tölthetők és önkisülésük alacsony, tárolásuk és felhasználásuk igen kedvező. Hátránya a Li-Po akkumulátoroknak, hogy a teljes kisütés tönkreteszi őket, valamint, hogy töltési sebességük általában nem haladhatja meg az 1 C-t.

⁹ A „C” az akkumulátorok névleges kapacitását jelenti.

Várhatóan a technika fejlődésével a fent említett korlátok tovább fognak tágulni, így az elektromos repülőkkel a jövőben számolni kell.

A továbbiakban a teljesség igénye nélkül néhány tipikusnak mondható elektromos hajtású robotrepülőt mutatok be, melyek technikai paraméterei jól tükrözik az elektromos gépek képességeit.

1.1.2. "Dragon Eye" – Naval Research Laboratory [1.7.]

A Naval Research Laboratory által fejlesztett kétmotoros, csupaszárny repülőgép főbb paraméterei a következők (1.1. táblázat):

Fesztávolság	1,14 m
Hossz	0,9 m
Felszálló tömeg (hasznos teherrel)	2,3 kg
Hatósugár	5 km
Repülési idő	30-60 perc
Szolgálati magasság	100-150 m
Fedélzeti navigáció	GPS/autopilot
Hasznos teher	Nagy fényérzékenységű kamera, videoadó.

1.1. táblázat: A „Dragon Eye” robotrepülőgép főbb technikai adatai



1.1. kép: „Dragon Eye”¹⁰

A „Dragon Eye” repülőgépet két háromfázisú villanymotor hajtja (1.1. kép¹⁰). A tervezés során figyelembe vették a szállíthatóság és az összeszerelhetőség problémáját. Ennek köszönhetően az üzemeltetéséhez elegendő két ember. A gépet szétszerelve egy hátizsákkonténer tárolja. Az összeszerelés 10 perc, az indítás kézből, eldobással történik. A

hazatérő gép hasra száll. Az üzemeltetés nem igényel repülőteret, vagy más, speciálisan előkészített helyszínt.

¹⁰ Forrás: <http://www.strikenet.js.mil/uavairshow/dragoneye.htm> (2005. január)

1.1.3. FQM-151A „Pointer” – French Armee de Terre [I.8.]

A „Pointer” (1.2. kép¹¹) szintén elektromos hajtású robotrepülőgép, melynek főbb paraméterei az 1.2. táblázatban láthatók.

Fesztávolság	2,7 m
Hossz	1,8 m
Felszálló tömeg (hasznos teherrel)	4,1 kg
Hatósugár	8 km
Repülési idő	1,5 óra
Szolgálati magasság	-
Fedélzeti navigáció	katonai GPS/autopilot
Hasznos teher	Nagy fényérzékenységű kamera, infrakamera, videoadó, különféle vegyi és sugárszenzorok.

1.2. táblázat: A „Pointer” robotrepülőgép főbb technikai adatai



1.2. kép: „Pointer”¹¹

A gép kevlár kompozit építésű. Üzemeltetéséhez elegendő két személy. Tárolása kisméretű hátizsákban történik. A start kézből eldobással történik. A bevetésről visszatérve a repülő automatikusan (a kezelő beavatkozása nélkül) közelíti meg a leszállóhelyet, és „hasra” száll. A gépet úgy tervezték, hogy az orrban elhelyezett szenzorok a mindenkori feladat függvényében cserélhetők legyenek. A fedélzeti navigációs rendszer folyamatosan adatokat szolgáltat a földi állomásnak, így monitoron nyomon követhető a gép pillanatnyi helyzete. A kifejlesztett földi szoftver segítségével lehetőség nyílik a gép feladatainak bevetés alatti módosítására is. Az elektromos hajtású repülő 1,5 órás üzemideje figyelemreméltó.

¹¹ Forrás: <http://www.aerovironment.com/area-aircraft/prod-serv/pointer.html> (2005. január)

1.1.4. „BIODRONE”¹² [1.9.]

A 1.3. táblázat a „BIODRONE” nevű, elektromos robotrepülőgép főbb technikai paramétereit tartalmazza.

Fesztávolság	3,4 m
Hossz	1,8 m
Felszálló tömeg (hasznos teherrel)	10 kg
Hatósugár	20 km
Repülési idő	70 perc (NiCd) 1,5 óra (NiMh)
Szolgálati magasság	300 m
Fedélzeti navigáció	katonai GPS
Hasznos teher	kamera, infrakamera, videoadó

1.3. táblázat: A „BIODRONE” robotrepülőgép főbb technikai adatai



1.3. kép: „BIODRONE” elektromos robotrepülőgép¹²

Noha a bemutatott repülőgépek látszólag egyszerűek, értékük az építésüknél alkalmazott technológiák, valamint a bennük elhelyezett elektronikai eszközök miatt jelentős. Az UAV-k kezelői személyzetét nemcsak elméleti, hanem gyakorlati oldalról is képezni, illetve tréningeztetni kell. A képzés gyakorlati szintjén a leghatékonyabb és egyben kockázatmentes módszer a szimulátor alkalmazása. A következő alfejezetben **célom rámutatni** a szimulátorok jelentőségére, hasznosságára, valamint arra a tényre, **hogy a robotrepülőgép egy komplex rendszer része, melynek hatékonysága a rendszer összességében keresendő.**

¹² Forrás: <http://www.alcore-tech.com/default.htm> (2005. január)

1.2. Szimulátorok a pilóta nélküli repülőeszközök kiképzési feladataiban

Az UAV-k bevetéseit típustól és feladattól függően 1-4 fő irányítja. Természetesen egy-egy bevetést lényegesen nagyobb számú személyzet biztosít. Magát a repülést azonban csupán néhány fő hajtja végre. Léteznek ugyanakkor olyan UAV törekvések, melyek egy, esetleg két kezelőszeméllyel a gép teljes kiszolgálását és üzemeltetését képesek ellátni. Az UAV-k üzemeltetését azonban – bármely típusról is legyen szó – gyakoroltatni kell, mely feladat ellátására különféle szimulátorokat alkalmaznak.

Szimulátorok fejlesztésével több vállalat, illetve kutatóintézet is foglalkozik. A bostoni „Meta VR Inc.”, USA egyik jelentős vállalata [6]. Az általuk előállított komplex rendszer magában foglalja az UAV földi irányító központját (1.4. kép¹³), valamint annak teljes kiszolgálóegységeit. A rendszer nagy előnye, hogy szimulációs feladatok ellátására is alkalmas. Mivel a kezelő ugyanazon a felületen, ugyanabban a munkakörnyezetben végzi a szimulációt, a valós bevetés nem okoz átállási nehézséget. Az önjáró földi vezérlőegység része az UAV katapult is (1.5. kép¹³). Túl a kompaktság adta előnyökön további pozitívum, hogy a szimulációt végrehajtó személyzet a munkaállomás megközelítése során ugyanazzal a látvánnyal találkozik, mint a valós bevetésen. Pszichológiai szempontból ez igen fontos, mivel a szimulációk egyik jelentős problémája, hogy a gyakorlást végző kezelő tudatában csökken a kockázat mértéke, mivel tudja, hogy a feladat bármikor megismételhető. A „Meta VR Inc.” komplex rendszere mind külsőleg, mind pedig, belső felépítésében, matematikájában és vizuális megjelenítésében igyekszik a lehető



1.4. kép: A „Meta VR Inc.” földi irányítóegysége¹³



1.5. kép: A „Meta VR Inc.” „katapultja”¹³

¹³ Forrás: <http://www.metavr.com/casestudies/TUAV.html> (2005. január)



1.6. kép: A „Meta VR Inc.” földi irányítóegységének pilóta munkahelye¹⁴

alacsonyabb, mint az így szerzett nyereség. Nyilvánvaló azonban, hogy gyakorlás során törekedni kell a gép sértetlenségére, ez azonban kizárja az ilyen jellegű feladatok teljes értékű gyakorlását. A „Meta VR Inc.” rendszere alkalmas különféle komplex cselekmények szimulálására, melyben az UAV csupán egy irányított objektum.

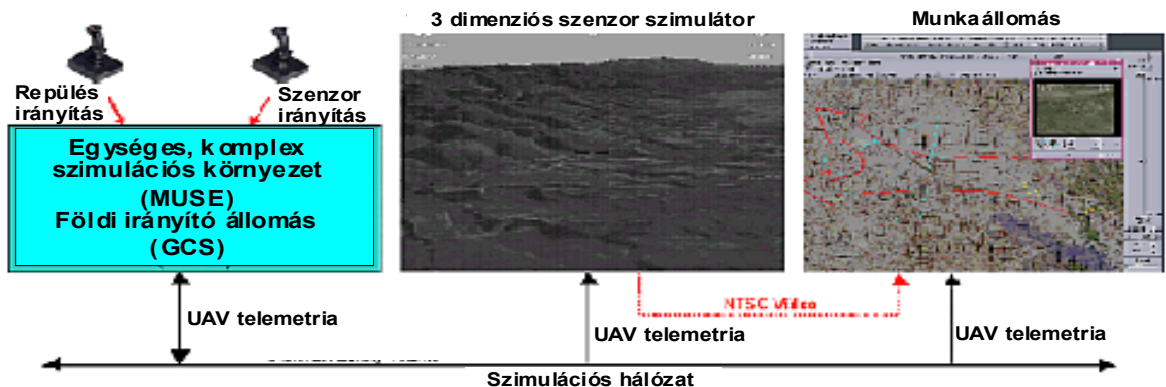
A szimulációs rendszer komplexitására

legvalóságosabb képet mutatni. A monitorokon megjelenő képeket (1.6, 1.7. kép¹⁴) nagyteljesítményű számítógépek állítják elő. A látvány egyenértékű a valós bevetések során tapasztaltakkal.

A szimulátorok nemcsak a kezelőszemélyzet alap kiképzésében nyújtanak segítséget. Lehetőség nyílik olyan bevetési szituációk gyakorlására is, melyek során a gép elvesztése tervszerű. Az ilyen szituációkat éles bevetésen, ritkán kényszerhelyzetben alkalmazzák. A kockázatelemzések során kimutatható, hogy a gép elvesztésével járó bevetés vesztesége



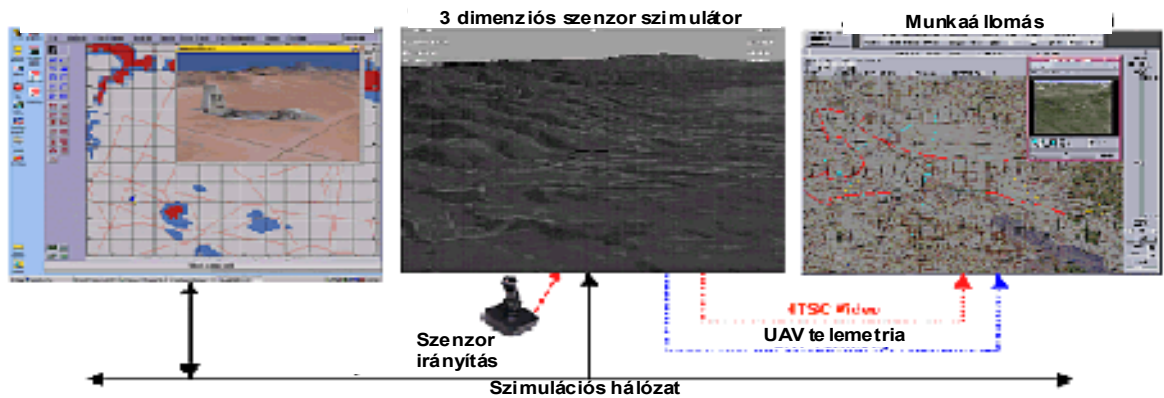
1.7. kép: A „Meta VR Inc.” földi irányítóegységének pilóta munkahelye¹⁴



1.8. kép: A „Meta VR Inc.” földi irányítóegységének elvi vázlata

¹⁴ Forrás: <http://www.metavr.com/casestudies/TUAV.html> (2005. január)

jellemző például, hogy a fedélzeti megfigyelőrendszer kezelése két, egymástól eltérő módban is gyakorolható úgy, hogy ehhez nem kell semmiféle külön modult, vagy opciót megvásárolni (1.8. kép¹⁵).



1.9. kép: A „Meta VR Inc.” földi irányítóegységének elvi vázlata¹⁵



1.10. kép: A „Meta VR Inc.” szimulációs moduljának felhasználói felülete¹⁵

Lehetőség van olyan bevetések szimulálására, ahol az UAV pilóta vezeti a gépet, miközben a mellette ülő felderítő kezeli a szenzorokat (pl. kamera) (1.9. kép¹⁵). Ebben az esetben nemcsak az egyéni feladatok, hanem a csoport együttműködésének begyakorlása a cél. Ez igen fontos feladat, mivel a célok eléréséhez több ember vagy csoport összehangolt munkája szükséges.

Amennyiben a felderítő személyzet kiképzése, illetve gyakoroltatása a cél, vagy egy speciális repülés során kell feladatot megoldani, lehetőség van az UAV „gépi” vezetésére. Ez azt jelenti, hogy az UAV útvonalát egy megfelelő programmodul tárolja és azon „vezeti” a gépet (1.9. kép¹⁵). A felderítő kezeli a szenzorokat, melyek kihatással lehetnek a gép dinamikájára (a törzsből kinyíló kamera vagy egyéb szenzor, esetleg speciális eszköz kidobása stb.). Az UAV vezetését végző számítógép ezeket a változásokat beépíti a gép repülésébe, amitől a felderítő

¹⁵ Forrás: <http://www.metavr.com/casestudies/UAVvisual.html> (2005. január). Magyar feliratokat készítette Molnár András.

érzékelési saját beavatkozásainak hatását.

UAV fejlesztők részére készült az „Opal RT Technologies Inc.” vállalat szimulátor rendszere [I.1]. Ennek a terméknek alapvető célja, hogy az UAV kifejlesztését segítse. A szimulátor által lehet összeállítani egy új repülőeszközt, melynek várható tulajdonságait azonnal lehet tesztelni, szimulálni.

Az „RT-LAB UAV Engineering Simulator” funkcionálisan több modulból felépülő rendszer. A tervező-, fejlesztőmodul (1.10. kép¹⁵) segítségével elkészíthető a repülőeszköz. Nemcsak a geometriai megtervezésére, hanem a meghajtásra, fedélzeti szenzorok elhelyezésére is lehetőség nyílik. Megadható továbbá, hogy az UAV várhatóan milyen környezetben fog üzemelni (talajviszonyok légköri viszonyok stb.). Természetesen az 1.10. képen¹⁵ látható ikonok a tervezőmodul további részmoduljainak az elérését teszik lehetővé. Ezek a részmodulok önálló, komplex egységek, melyek magas színvonalú, részletes matematikai modell alapján segítik a tervezést. A robotpilóta, illetve az egyéb fedélzeti, számítástechnikai modulok tervezését nagyméretű adatbázisból kiválasztható mikrokontrollerekből, illetve azok kiegészítőiből lehet megvalósítani. Az adatbázis gyakorlatilag a kereskedelemben kapható összes mikrokontrollert és azok kiegészítőit tartalmazza!

Az ellenőrzőmodul az elkészült repülőeszköz szimulációját végzi. Ez a modul valós idejű számításokra és megjelenítésekre is képes, aminek köszönhetően nem csupán a dinamikai analízisek grafikonjait képes kirajzolni, hanem magát a mozgó repülőt is megjeleníti, mintegy valóságos képet mutatva a tervezett eszközről.

Az „Unmanned Dynamics LLC” több ismert UAV szimulációjára alkalmas szoftverrendszert fejlesztett ki [I.2, 16]. A rendszer többek között alkalmas az „Aerosonde”, „ACR SWARM UAV” és a „Raytheon Beech MQM-107” gépek szimulációjára (1.11. kép¹⁶).



Aerosonde UAV



Advanced Ceramics Research SWARM UAV



Raytheon Beech MQM-107 Streaker

1.11. kép: Az „Unmanned Dynamics LLC” szimulátora által kezelt UAV-k ¹⁶

¹⁶ Forrás: <http://www.u-dynamics.com/aerosim/default.htm> (2005. január)

A program rendelkezik egy „Aircraft Dynamic Model” modullal, mely segítségével tetszőleges UAV, 6 szabadsági fokú, nemlineáris dinamikai jellemzői programozhatók be. Lehetőség van a repülő irányítófelületeinek dinamikus jellemzőinek beállítására is (szervók beállási sebessége, nyomatéka stb.). Ugyanezen modul segítségével beállíthatók különféle környezeti jellemzők, mint például légnyomás, hőmérséklet és gravitáció. A modul alapját a „Mathlab Simulink” felülete és motorja alkotja. A gép teljes dinamikáját grafikus folyamatábra-szerű programozás teszi átláthatóvá.

A szoftver felhasználói felülete rendkívül igényes. A felhasználó különféle nézetek közül



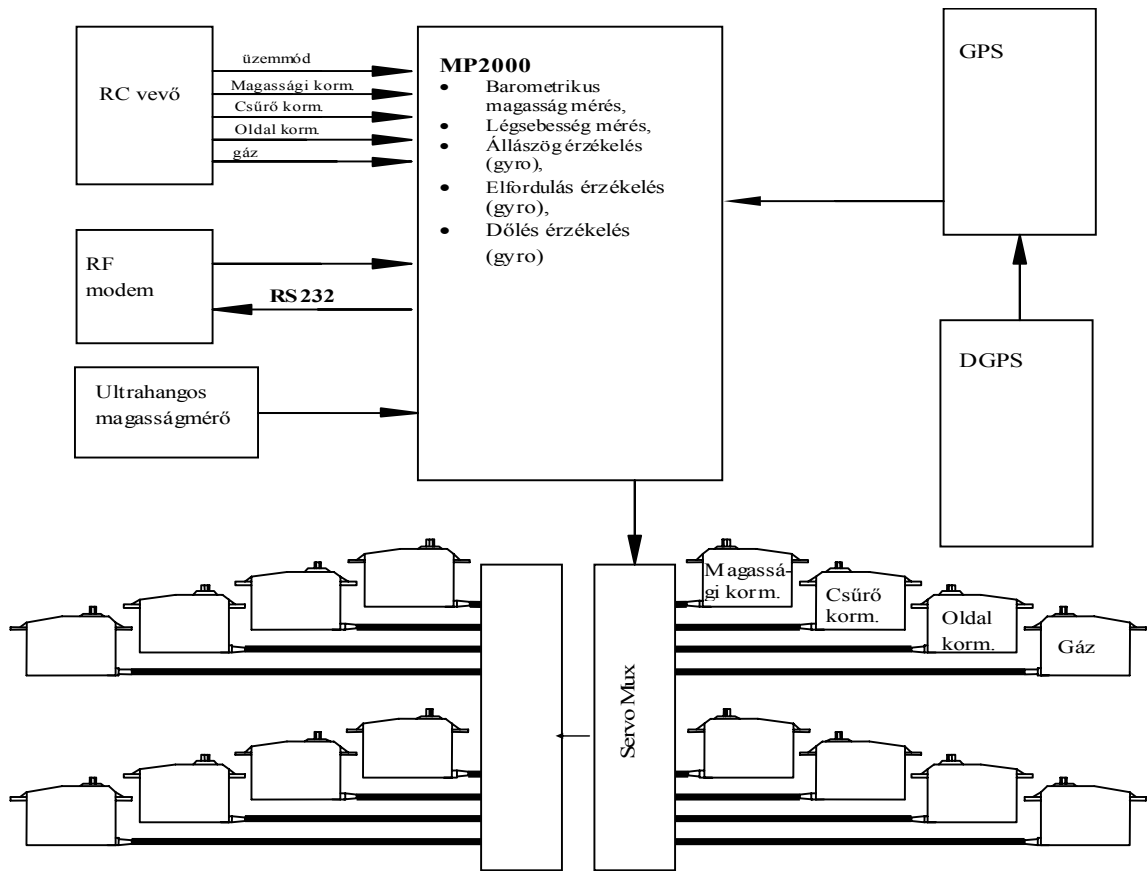
1.12. kép: Az „Unmanned Dynamics LLC” szimulátorának felhasználói felületei¹⁷

választhat (1.12. kép¹⁷). Ezek segítségével lehet a vizuális szenzorok (kamerák) képei alapján vezetni az UAV-t, de lehetőség nyílik tisztán a fedélzeti műszerek adatai alapján kezelni a gépet. Az UAV dinamikai viselkedésének ellenőrzése céljából különféle grafikai paneleken keresztül lehet megfigyelni a gép rövid és hosszú periódusú lengéseit, illetve a zavarásra adott válaszait.

Kisméretű UAV-k fedélzeti rendszerét gyártja a kanadai „MicroPilot Inc.” [I.3]. Bár a cég komplett repülőgépet is forgalmaz, fő tevékenységi körük a fedélzeti robotpilóta rendszer fejlesztése. Az MP2000 rendszer képes előre megtervezett útvonalon végigvezetni a gépet emberi beavatkozás nélkül. A fedélzeti rendszer felépítése moduláris, mely lehetővé teszi az alapegység funkcionális bővítését. Mivel a cég nem egy konkrét UAV-t forgalmaz, hanem egy általánosan felhasználható fedélzeti robotpilóta rendszert, az

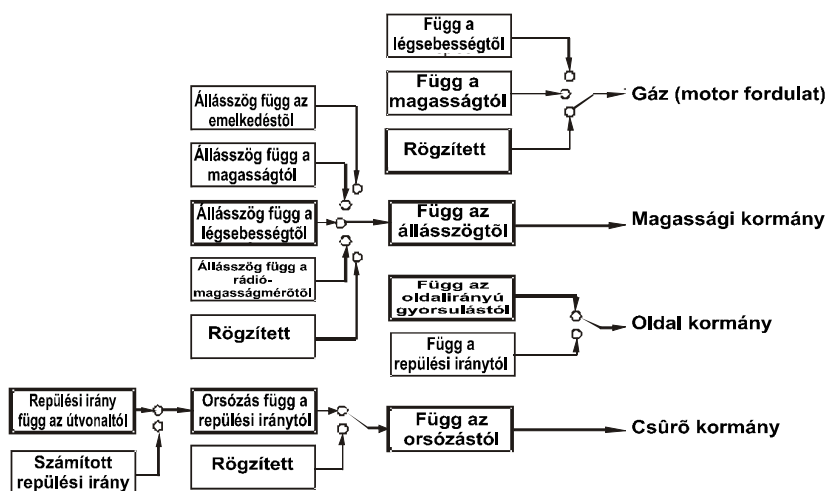
¹⁷ Forrás: <http://www.u-dynamics.com/aerosim/> (2005. január). Magyar feliratokat készítette Molnár András.

elektronika beállítása komoly szakértelmet igénylő feladat (1.2. ábra¹⁸). A rendszer



1.2. ábra: Az „MP2000” robotrendszer blokkvázlata¹⁸

beállításának legnehezebb, egyben leglényegesebb része az egyes szabályzóhurkok beállítása (1.3. ábra¹⁸). Az MP2000 része [7] egy programcsomag, mely segítségével



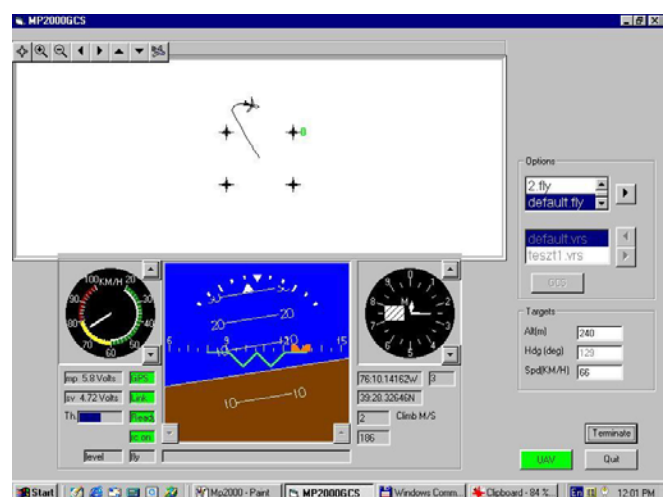
1.3. ábra: Az „MP2000” robotpilótarendszer szabályzóköreinek blokkvázlata¹⁸

programozható a fedélzeti elektronika. Ennek segítségével lehet új útvonalakat, repülési paramétereket az UAV számára beállítani és ez a program biztosítja a repülés-szabályzó egységek hangolását is.

¹⁸ Forrás: MP2000 kézikönyv. Magyar feliratokat készítette Molnár András.

Az MP2000 programja rendelkezik szimulációs funkciókkal is, bár ezek elsősorban az útvonaltervezés megkönnyítését, illetve ellenőrzését szolgálják. A szimulált bevetés során az MP2000 képernyőjén megjeleníthető az aktuális terület térképe vagy légi fotója. Egy kis repülő sziluett jelzi a gép pillanatnyi pozícióját, miközben a virtuális műszereken (műhorizont, sebesség-, magasságmérő, varióméter stb.) megfigyelhetők a gép fontosabb repülési paramétereit (1.13. kép¹⁹). Lehetőség nyílik a szimuláció megszakításával adott paraméterek módosítására, majd a szimuláció folytatására. A program érdekessége, hogy ha a rendszer rendelkezik RF modemmel, akkor a szimulátor felhasználói felületén a valós repülés adatai jelennek meg, mintegy földi vezérlőközponttá alakítva az MP2000 programrendszerét. Ebben az esetben lehetőség nyílik az UAV feladatának repülés közben történő módosítására is.

A kisméretű UAV-k berepülése esetében gyakran van szükség távirányításra. A berepülések kezdeti szakaszaiban a gép mindig látótávolságon belül marad. Ezen repülések célja a gép aerodinamikai beállítása, úgynevezett trimmelése. A repülők „külső nézeti” vezetése gyakorlatot igénylő feladat. A legnagyobb nehézséget a kezelő nézőpontjához viszonyított irányok változása okozza. Amíg a gép a kezelőtől távolodik, a jobb és bal irányok egyértelműek, ugyanakkor a közeledő gép jobbra fordítása a kezelő szemszögéből nézve bal irány! Ez a probléma néhány órányi gyakorlással megszüntethető. A kockázatok csökkentése érdekében célszerű a gyakorlást szimulátoron végezni. A modern szimulátor programok képesek több, eltérő viselkedésű merev, vagy forgószárnyas repülőszerkezet szimulációjára, ami azért is előnyös, mert könnyebb az alapok elsajátítása egy nyugodt, lassú repülőgéppel, mint az erős rutint igénylő, az eredeti UAV-t szimuláló modellel. A szimulációs programok egy része csupán az irányításhoz szükséges mozdulatok mechanikus végrehajtásának begyakorlására készülnek. A többfunkciós programok azonban képesek a környezeti változások figyelembevételével (szél, turbulencia, termikék, talajviszonyok)

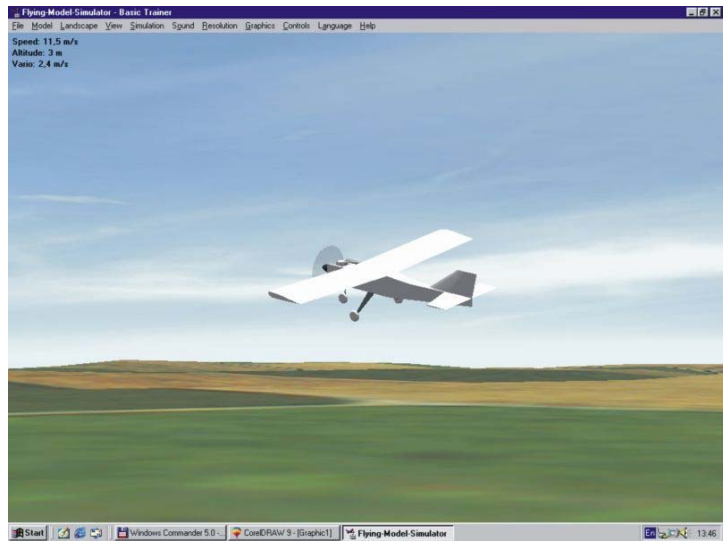


1.13. kép: Az „MP2000” robotpilótarendszer felhasználói felülete¹⁹

¹⁹ Forrás: Az MP2000 szimulációs moduljának képe. A képen látható szimulációs állapotot beállította és készítette Molnár András.

szimulálni a repülést, ami szélesebb körű felhasználást tesz lehetővé. Ezeket az úgynevezett „külső nézeti” szimulátorokat hasonló céllal gyakran használják modellezők.

Michael és Roman Möller (1999-2005) által fejlesztett FMS (Flying Model Simulator) program az Internetről ingyenesen letölthető és használható [1.3]. A program képes fogadni a távirányító jeleit. Az adatbázisból kiválasztott terepen, valamint a száznál is több modell egyikével lehetőség nyílik a repülés alapvető szimulációjára (1.14. kép²⁰). A modellek leírása egy szöveges állományban található, melyek alapján könnyen lehet készíteni saját modellt. Ez abban az esetben lehet célszerű, ha az adatbázisban nem található a szimulálni kívánt UAV-hez hasonló paraméterű modell.



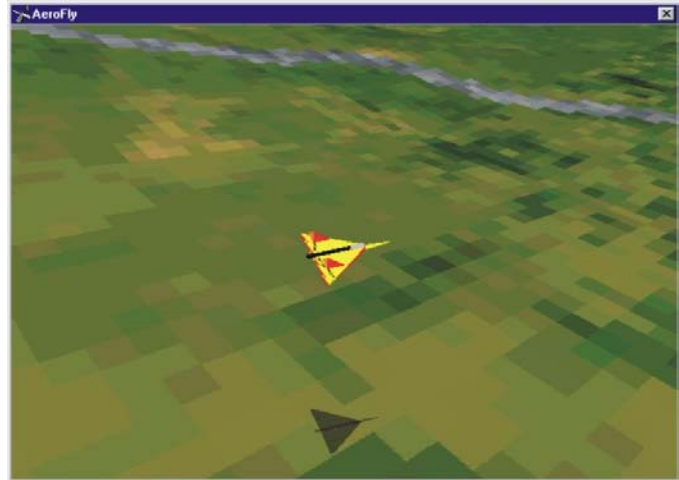
1.14. kép: Az „FMS” szimulátor program képe²⁰

Az FMS főleg az UAV irányításának mechanikus mozdulatait képes begyakoroltatni. Segítségével a kormánymozdulatok reflexszerűvé válnak, ami nagyon fontos a valódi repülések során. Mindazonáltal a program környezeti szimulációja gyenge. Valódi turbulenciát, szelet, illetve egyéb áramlatokat nem képes valósághűen szimulálni. A program további gyenge pontja a repülésdinamika. Bár látszólag minden manővert el lehet végezni a szimulátoron, azok realitása alacsony szintű.

A 2005-ben megjelent „FMS 2.0 alpha 8.5”-ös változat már lehetővé teszi a szél, a turbulencia, valamint a termitek szimulációját. Ebben a változatban már lehet a repülőgépeket a földön is mozgatni, de a teljes program realiztikussága még mindig hagy kívánnivalót. További érdekesség, hogy a program számol az akkumulátorok kimerülésével (elektromos hajtású modellek esetében), illetve az üzemanyag fogyasztásával (belsőégésű motorok esetében).

²⁰ Forrás: http://n.ethz.ch/student/mmoeller/fms/index_e.html (2005. január). A képet az FMS program segítségével készítette Molnár András.

Az IPACS cég terméke az „AeroFly” program, mely hasonló az FMS programhoz [I.4]. Lényegi különbség az előbbihez képest, hogy az AeroFly szimulációja a környezeti paraméterekre is kiterjed. A szimulátor korrektül kezeli a földi mozgásokat (egyenetlenség, farokfutós gépek mozgása stb.), a légköri turbulenciát és a szélmozgásokat. További előny, hogy egyes modellek esetében lehetőség van ívelő, illetve féklapok használatára is. A program alkalmas alapvető repülési ismeretek elsajátítására is (1.15. kép²¹).



1.15. kép: Az „Aero Fly” szimulátor program képe²¹

Általánosságban megállapítható, hogy az UAV-k kezelőinek kiképzése és gyakorlatoztatása során célszerű szimulátorokat alkalmazni. Ezt igazolja az a tény is, hogy számos helyen, ahol valamilyen típusú UAV-t üzemeltetnek, alkalmaznak szimulátorokat. A fentiek alapján célszerűnek tartom, hogy a hazai fejlesztésű UAV-k majdani kezelőit a nemzetközi példákhoz hasonlóan szimulátorokon kell kiképezni. Mivel a professzionális szimulátor rendszerek költségei magasak, megfelelő lehet az alapképzés során az általános célú, realitás szempontjából gyengébb, ezáltal olcsón beszerezhető szimulátorok alkalmazása.

A szimulátorok abban az esetben lesznek maximálisan hatékonyak, ha nemcsak a szimulációs motor²², hanem a vizuális megjelenítésük is valósághű. Egyszerűbb szimulátorok ugyan képesek látványos környezetek generálására, de a kiképzési és gyakorlati szempontból jól hasznosítható rendszerek alkalmasak valós területek kivetítésére is. A valós környezet megjelenítése térképi adatbázisok felhasználásával történik.

²¹ Forrás: <http://ipacs.de/afold/> (2005. január). A képet az AeroFly program segítségével készítette Molnár András.

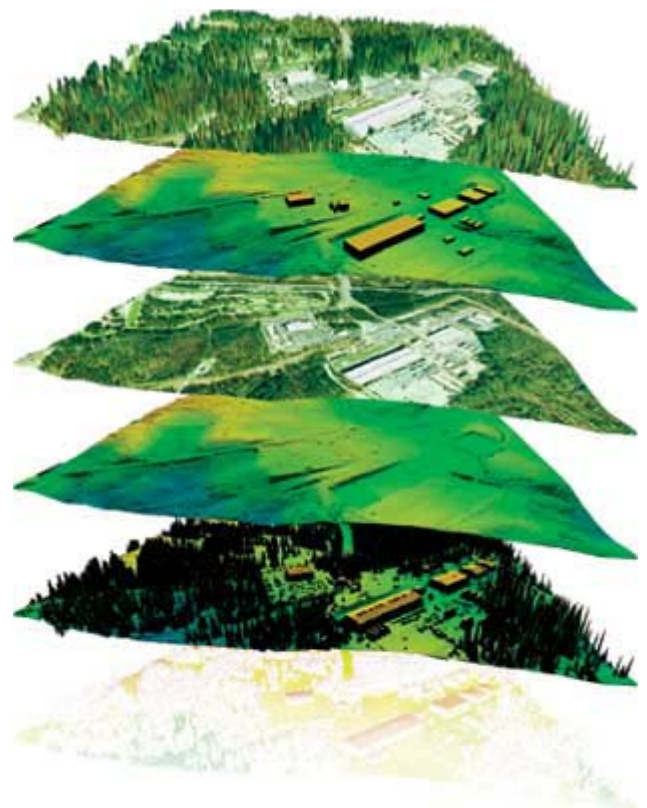
²² A szimulációs motor a szimulációhoz felhasznált matematikai modelleket kezelő programmodul. Ennek a modulnak, pontosabban az általa alkalmazott modelleknek a jósága határozza meg a szimuláció realizitkusságát.

1.3. Térinformatikai rendszerek alkalmazása robotrepülők esetében

A modern számítástechnika, valamint az egyre nagyobb teljesítményű számítógépek megteremtették a gyakorlatban is alkalmazható térinformatikát [20]. A térinformatika összetett terület, mely az alábbi szakterületekből épül fel:

- Digitális térképészet. Itt alapvetően a vektor alapú térképek használatáról van szó, bár bizonyos esetekben az úgynevezett raszteres képek is használatosak [21].

- „Multi-layer” technológia alkalmazása. Szemléletesen ez olyan megoldást jelent, ahol az ábrázolni kívánt térképet több átlátszó fólián (layer) jelenítik meg. Minden egyes fólia a térkép csak bizonyos jellemzőit tartalmazza (pl.: úthálózat, vízrajz, épületek stb.) (1.4. ábra²³). A terep teljes megjelenítése során minden fólia kivetítésre kerül. Gyakorlati szempontból jobban kezelhető a térkép, ha az csak a feladathoz szükséges szimbólumokat tartalmazza. Ebben az esetben a rendelkezésre álló rétegek közül csak a szükséges információkkal rendelkezők kerülnek megjelenítésre.



1.4. ábra: Többrétegű térkép felépítési vázlat²³ [8]

- Adatbázis kezelő rendszer. A térinformatikát valójában a térképi elemekhez kapcsolt adatbázis teszi teljessé. Ennek lényege, hogy a térképeken szereplő objektumokhoz további információk csatolhatók (pl.: épülethez befogadóképesség, folyóhoz vízhozam stb.).
- Vizuális eszközök. Ezek feladata a felhasználói felület megteremtése, amelyen keresztül az operátor hozzájut a megfelelő információhoz. A rendszer biztosítja a kényelmes kezelést, valamint a beállításoknak megfelelő megjelenítést. Fejlett programok arra is képesek, hogy a térképi állományokhoz csatolt adatbázis adatai

²³ Forrás: http://www.esri.com/mapmuseum/mapbook_gallery/volume18/defense3.html (2005. január)

alapján új perspektívájú ábrázolást valósítsanak meg. Ilyen ábrázolás lehet, például egy épületekkel fedett terület (városrész), ahol az épületek magasságát egy megfelelő



1.5. ábra: Háromdimenziós kép előállítás²⁴

adatbázis tárolja. Egyszerűbb esetben kérhető, hogy a térképen jelenjenek meg az adott objektumok magasságértékei, de a modern szoftverek képesek előállítani a terület háromdimenziós képét is (1.5. ábra²⁴). Noha, az így előállított kép többletinformációt nem tartalmaz, a látvány megkönnyíti a bevetést tervező személyek munkáját.

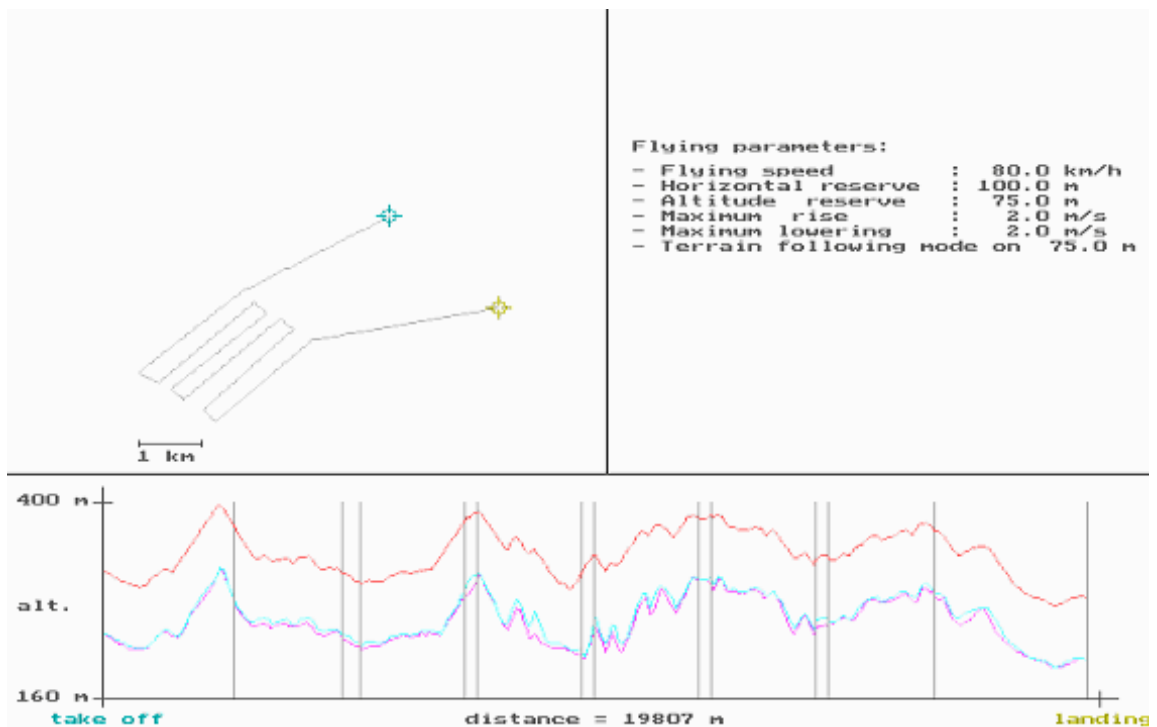
Az UAV-k alkalmazása során gyakorlatilag minden esetben szükség van térképre. Hagyományos eljárás során a bevetést előkészítő csoport a megfelelő térképeken megtervezi az UAV útvonalát. Ez a tevékenység rendkívüli körültekintést igényel: figyelembe kell venni többek között a terepviszonyokat, az útvonal mentén található objektumokat, a lehetséges kényszerleszálló mezőket stb. Mindez, általában egy sík térképen történik, mely természetesen tartalmazza a megfelelő információkat, de éppen a nagymennyiségű információ tartalom miatt megnő a tévedés lehetősége.

A térinformatika nemcsak az útvonal tervezésében jelent segítséget, de általa lehetőség nyílik különféle szempontok szerinti optimalizálásra is. Megfelelő adatok esetében, az UAV útvonalának tervezése során, a számítógépes rendszer képes - az előre megadott peremfeltételek figyelembevételével - elkészíteni a repülési útvonalat. Ilyen feltétel lehet,

²⁴ Forrás: <http://www.esri.com/> (2002. december).

például a legrövidebb idő, a szükséges manőverek minimalizálása, vagy a legalacsonyabb repülési magasság meghatározása. A feltételek természetesen mindig az adott feladattól és a környezeti adottságoktól függenek, mely feltételek azonban gyorsan változhatnak. Ebben az esetben szükség lehet az új helyzetnek megfelelő útvonal megtervezésére. Egy megfelelő térinformatikai rendszer képes hatékony és gyors megoldással szolgálni.

A magasság optimalizálásának egy lehetséges példája a Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Elektronikai Hadviselés Tanszékén Horváth Zoltán által kidolgozásra került program [9]. A program Magyarország digitális domborzatmodelljét használja adatbázisnak, és képes több peremfeltétel mellett meghatározni egy repülőgép pályadatait.



1.6. ábra: Magassági profil tervezése domborzatmodell segítségével²⁵

A 1.6. ábrán²⁵ megjelenített képernyőablak alján látható grafikon a felette látható repülési útvonal magassági metszetét ábrázolja. A jobb felső harmadban található a kiindulási peremfeltételek. Ezek alapján történik az UAV repülési profiljának (felső görbe) kiszámítása, mely során a rendszer figyelembe veszi a repülőgép képességeit (maximális emelkedés, süllyedés, sebesség, fordulási sugár). Az eredmény megjelenik grafikus formában, illetve egy koordinátákat tartalmazó adatfájlban, ahol a koordinátapontok fordulópontokat vagy magasságváltási pontokat jelölnek. Ez a kimeneti fájl alkalmas robotrepülőök fedélzeti rendszereinek felprogramozására.

²⁵ Forrás: A programot fejlesztette, és a képet készítette Horváth Zoltán.

Következtetések

A robotrepülőgépek terén végzett kitekintésem alapján az alábbi megállapításokat teszem:

- Nemzetközi szinten a pilóta nélküli repülőgépek elterjedése számottevő. Egyes államok hadseregei **már több típust is rendszerbe állítva alkalmaznak**. Igen jelentős azoknak az államoknak a száma, amelyek már kísérleti jelleggel alkalmaznak robotrepülőket, és a közeljövőben tervezik azok rendszerbeállítását. A fentiekből arra lehet következtetni, hogy **a közeljövőben a robotrepülőgépek jelentős szerepet kapnak** a modern hadseregek palettáján.
- Egyes államok jelentős anyagi befektetésekkel támogatják a robotrepülőgépek fejlesztését, ennek hatására számos prototípus került bemutatásra. **A fejlesztések irányvonalai az egyre gazdaságosabb üzemeltetésű, valamint egyszerű kezelhetőségű eszközök felé mutatnak.**
- A robotrepülőgépek fejlesztésével foglalkozó intézetek jelentős része infrastruktúrát is kínál gépei mellé. Ezek a **kiegészítő elemek** általában **a földi vezetési ponton** felül tartalmazzák **speciális** (az adott géptípushoz kifejlesztett) **szimulátorokat, adatfeldolgozó egységeket** és modern, térképi adatbázisokat felhasználó **háromdimenziós megjelenítő rendszereket**.
- Azokban az államokban, ahol már alkalmazzák, vagy fejlesztik a robotrepülőgépeket, a **repülőgép egy komplex rendszer része**. Ez az összetett rendszer képes azokkal az előnyökkel rendelkezni, amik biztos teret engednek ennek az új eszköznek. A rendszer egyetlen eleme sem kiemelt (UAV, földi irányító egység, szimulátor, térinformatikai rendszer stb.), de bármely részegység kimaradása minőségi romlást eredményez. Ebből következik, hogy **az UAV-k fejlesztése és üzemeltetése maximális hatékonysággal, kizárólag a teljes rendszer szemléletén keresztül valósulhat meg!**

A pilóta nélküli repülőgépek üzemeltetési költségeinek csökkentése olyan repülőszerkezetek kifejlesztésével lehetséges, amelyek fedélzeti rendszerei nem igényelnek speciálisan kiképzett kezelőszemélyzetet. Ennek megvalósítása magas intelligenciával rendelkező vezérlőegységekkel, valamint kiváló repülési tulajdonságokkal²⁶ rendelkező sárkányszerkezettel lehetséges.

²⁶ A kiváló repülési tulajdonság alatt itt az önstabil, külső zavaró hatásokra fedélzeti elektronika nélkül is érzéketlen repülőszerkezet értendő.

II. Kísérleti robotrepülőgép sárkányszerkezetének gazdaságos kialakítása

Ebben a fejezetben azokat a legfontosabb irányelveket foglalom össze, melyek segítségével az alábbi tulajdonságokkal rendelkező sárkányszerkezet alakítható ki:

- **„Önstabil” repülőgép.** Ez azt jelenti, hogy külső zavaró hatásokat a repülőszerkezet külön beavatkozás nélkül²⁷ képes elhárítani.
- **„Jóindulatú” repülőgép.** Ez azt jelenti, hogy a gép széles határok között képes tolerálni az esetleges vezetési hibákat. Itt elsősorban a sebesség elvesztéséből adódó átesési hajlam csökkentése, illetve hatásának kezelhetősége a cél.
- **Széles sebességtartományú repülőgép.** Ez azt jelenti, hogy a feladatok függvényében a repülőgép legyen képes legalább 130-150 km/h, esetenként 200 km/h sebességre, ugyanakkor le lehessen lassítani akár 50 km/h sebességre. A lassítás célja, hogy a leszállásokat kis, nem repülőtéren kialakított területeken is végre lehessen hajtani.
- **„Vitorlázó” repülőgép.** A nagy hatótávolságot²⁸ a jó vitorlázóképesség biztosítsa. A többletüzemanyag miatt ne kelljen csökkenteni a hasznos teher mennyiségét.

A fenti igények teljesítése érdekében **megvizsgáltam a szárnyszelvények hatását, a szárny geometria hatását**, valamint a különféle **repülőgép kialakítások stabilitásra gyakorolt hatását**.

2.1. Szárnyprofilok és hatásaik

A robotrepülőgépek szárnyszelvénye (profilja) alapvetően meghatározza azok repülési tulajdonságát. Az UAV-k fejlesztése során a speciális profiloknak, illetve az aerodinamikai megoldásoknak akkor van jelentősége, ha a tervezett repülőgépnek különleges képességekkel kell rendelkeznie. Ilyen képesség lehet a rendkívül nagy hatótávolság, amikor a fogyasztás minimalizálása érdekében kis légellenállású, kiváló siklási teljesítményű szárnyra van szükség. Speciális képesség lehet az extrém nagy, vagy extrém kicsi repülési sebesség, illetve speciális energiaforrás (napelem), ahol a

²⁷ Jelen esetben ez úgy értendő, hogy sem a repülőgépet távirányítással vezető pilóta, sem pedig a fedélzeti elektronika nem szükséges a zavaró hatás elhárításához.

²⁸ A nagy hatótávolság jelen esetben 10-20 km sugarú kört jelent.

rendelkezésre álló energia kevés, így annak hasznosulása csakis az adott feladatra optimalizált repülőgép konstrukcióval lehetséges.

A repülőgépek repülési képessége a szárnyak körül áramló közeg (levegő) hatására keletkező felhajtóerő a Magnus-effektus és a Bernoulli-tétel alapján értelmezhető [1]. Noha felhajtóerő egy síklapon is keletkezik, ha annak állásszöge megfelelő, a repülőgépszárnyak metszete ívelt.

Az alábbiakban feltételezem, hogy a vizsgált szárnyak végtelen hosszúak, azaz a vizsgálat pontjától mind a szárnyvég, mind pedig, a törzs, vagy más, az áramlást módosító szerelvény (hajtómű) olyan távol van, hogy annak hatása elhanyagolható.

A 2.1. ábrán²⁹ egy tipikus szárnyprofil látható, mely segítségével definiálhatók a szelvény speciális pontjai. A levegő áramlása a belépő él felől a kilépő él felé történik. Egy adott szelvény esetében a felhajtóerő az áramló közeg sebességétől, valamint a szárny állásszögétől függ.

A szárnyprofil körül kialakuló áramlás a szelvény kerülete mentén eltérő



2.1. ábra: Tipikus szárnyprofil²⁹

nyomásviszonyokat hoz létre [2]. Méréssel, illetve számításokkal meghatározható a teljes szelvény kerületének minden pontján adott sebesség és állásszög esetén fellépő nyomásérték. Ezt a nyomásértéket a légköri nyomáshoz, pontosabban a szárnyat körülvevő zavartalan közeg nyomásához viszonyítjuk. Az így kapott nyomásértékeket (jelölése: C_p) a szelvény hosszának függvényében grafikusán ábrázolva kapjuk a nyomáseloszlás grafikonát. Ez a grafikon jellemző a szárnyprofilra. A nyomáseloszlás grafikon két görbét tartalmaz, melyek a szelvény húrja feletti felületen mérhető nyomáseloszlást, illetve a húr alatti nyomáseloszlást mutatják. Előfordulhat, hogy a két görbe többször is metszi egymást, de kezdő és végpontjaik minden esetben megegyeznek. Ebből következik, hogy a két görbe által határolt terület vagy területek zártak. Mivel a C_p értéke lehet negatív (C_p kisebb, mint a szabad közeg nyomása) és pozitív (C_p nagyobb, mint a szabad közeg

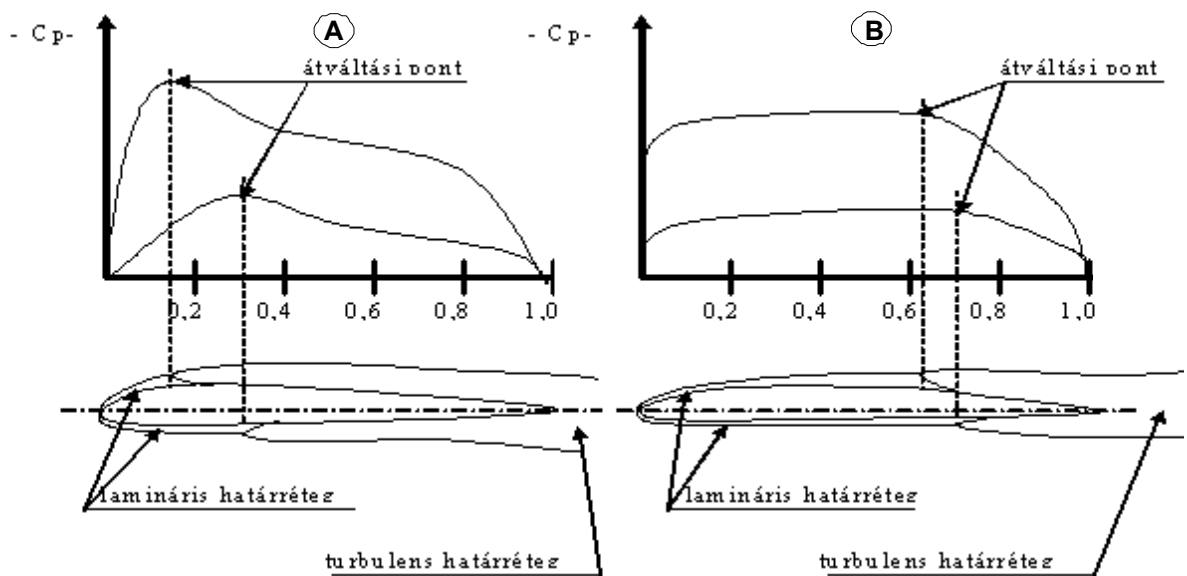
²⁹ Az ábrát készítette Molnár András.

nyomása), megkülönböztetünk negatív és pozitív területeket. Az előjelhelyesen összegzett terület arányos a szelvény felhajtóerő-tényezőjével (jelölése: C_l , vagy C_y).

A nyomáseloszlását vizsgálva több következtetést is levonhatunk az adott szelvényre vonatkozóan.

Az első, talán meglepő következtetés, hogy a szárnyakon keletkező felhajtóerő jelentős hányada a szárny felső felületén létrejövő nyomáscsökkenésből adódik. A szárny alsó felületén keletkező nyomásnövekedés a teljes felhajtóerő körülbelül egyharmad részét alkotja.

A nyomáseloszlásból következtetni lehet az úgynevezett átváltási pontra. A belépő él felől haladva a szelvény felületén a kilépő él felé az áramlás eleinte lamináris, majd egy pont után (átváltási pont) örvények keletkeznek, azaz az áramlás turbulenssé válik. A repülés szempontjából a turbulens áramlás kedvezőtlen, mivel növeli a szárny ellenállását, valamint csökkenti annak felhajtóerejét. Az átváltási pont ott található, ahol a kezdetben emelkedő jellegű nyomáseloszlás görbék határozottan csökkenő tendenciájú görbivé alakulnak.



A 2.1. diagram³⁰ két (A és B jelű) eltérő tulajdonságú szárnyszelvény nyomáseloszlását szemlélteti. Mivel a szelvény felső részén nyomáscsökkenés, az alsó

³⁰ Az ábrát Jereb Gábor, *Vitorlázó repülőgépek*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977 nyomán készítette Molnár András.

részén nyomásnövekedés alakul ki, a két görbének a vízszintes tengely alatt, illetve felett kellene lennie. A függőleges tengelyen a C_p abszolút értékét ábrázolva mind a két görbe a vízszintes tengely fölött található.

Jól megfigyelhető, hogy az „A” jelű szelvény esetében a kezdetben magas C_p a szelvény 25%-ánál erőteljes csökkenésnek indul. Ennek oka a szelvény felületén jelentkező turbulencia, mely a kilépő él felé haladva egyre nagyobb. A turbulens réteg kialakulását a diagram alatt található ábra szemlélteti.

A 2.1. diagramon a „B” jelű szelvény nyomáseloszlása eltérő jellegű az „A”-tól. Itt a C_p csökkenése később, körülbelül a szelvény 60%-ánál jelentkezik. A rövidebb turbulens réteg kisebb ellenállást jelent.

Azokat a szelvényeket, melyeknél a lamináris áramlás a szelvény húr hosszának 40-60%-áig tart, lamináris szelvényeknek nevezzük (2.1. diagram, „B” jelű szelvény). A hagyományos szelvények esetében a lamináris áramlás a húr hossz 20-30%-áig tart (2.1. diagram, „A” jelű szelvény).

A repülés feltétele, hogy a szárnyon keletkező felhajtóerő nagysága megegyezzen a repülőeszköz teljes tömegéből adódó súlyerővel. Amennyiben a felhajtóerő nagyobb, mint a súlyerő, a repülőgép emelkedik. A felhajtóerő nagyságának változtatása több módon lehetséges.

Adott állásszög és szárnyszelvény esetében a sebesség változtatása a felhajtóerő változását eredményezi. Ebben az esetben egyensúly, azaz a vízszintes repülés feltétele egy adott sebesség esetén teljesül. A sebesség változtatása nem elég dinamikus (a parancs kiadása és a gyorsulás bekövetkezése között repüléstechnikai szempontból sok idő telik el), így az csak a repülés különböző fázisainak (emelkedés, süllyedés, utazás) kialakítására alkalmas.

Adott állásszög és sebesség esetén a szárnyszelvény geometriájának alkalmas



2.1. kép: Lehajtott ívelőlapok³¹

módosítása révén lehet a felhajtóerőt befolyásolni. Ennek az egyik legegyszerűbb megvalósítása az úgynevezett ívelőlap (2.1. kép³¹). Ennek hatására a szárnyon jelentősen megnőhet a felhajtóerő, miközben a szárny ellenállása is növekedni kezd. Így a repülőgép adott hajtómű teljesítmény esetében lassulni

³¹ Forrás: <http://www.pbase.com/clements/image/34464212> (2005. február)

és emelkedni kezd. Csökkentve a hajtómű teljesítményt ismét elérhető az egyensúlyi állapot (vízszintes repülés) egy alacsonyabb sebességgel. Az ívelőlapnak gyakorlatilag a leszállás során van jelentősége, mikor a viszonylag nagy sebességű gépet a lehető legalacsonyabb, de még biztonságos sebességre kell lassítani. A geometria változtatásának egy másik fajtája, ha a szelvény teljes alakja változik (2.2. kép³²). Hajlékony szárnyak



2.2. kép: Levegővel felfúj, változtatható geometriájú szárny³²

esetében a repülés teljes időtartama alatt gyakorlatilag a szárnyak profilja a légerők hatására folyamatosan változik. Ez a módszer merevszárnyak esetében rendkívül bonyolult mechanikai kialakítású szárnyat és vezérlőrendszert (elektronika és mozgatórendszer) igényel. A hagyományos robotrepülőök esetében a rendkívül drága és

sérülékeny rendszer alkalmazása nem terjedt el.

Adott sebesség és szárnyszelvény esetén a szárny állásszögének változtatása a felhajtóerő nagyságának változását eredményezi. Mivel az állásszög változása azonnali kihatással van a felhajtóerőre, a hagyományos kialakítású repülőgépek esetében a leghatékonyabb magasságszabályozó módszer.

A szárnyszelvény geometriai kialakítása meghatározó a repülőeszköz repülési tulajdonságai szempontjából. Napjainkban már léteznek számítási modellek a szelvény várható viselkedésének meghatározására, de ezek rendkívül bonyolult és időigényes eljárások, továbbá eredményük is csupán tájékoztató jellegű. Minden komoly kutatóműhely, illetve repülőgépgyártó használ szélcsatornákat, amik segítségével a szárnyak, vagy akár az egész repülőeszköz repülési tulajdonsága mérhetővé válik.

Amennyiben a robotrepülőgép fejlesztése során nem új geometriai, aerodinamikai alakzatok kifejlesztése a cél, a szárnyszelvény kiválasztását célszerű adatbázis segítségével végezni. Az adatbázisok tartalmazzák az egyes szelvények szélcsatornás kísérletek alapján meghatározott jellemzőit, melyek nagy pontossággal jellemzik a szárny várható viselkedését.

Mivel a repülés során módosítható paraméter a gép sebessége, illetve állásszöge, az adatbázisok rendelkeznek olyan diagramokkal, melyek a felhajtóerő-tényezőt ábrázolják az

³² Forrás: American Institute of Aeronautics and Astronautics [18]

állásszög függvényében. Ezek az úgynevezett polárdiagramok, melyek segítségével meghatározható a szárny optimális, illetve kritikus állásszöge. Következtetéseket lehet levonni a szárny várható repülési tulajdonságairól, úgymint átesési hajlam, átesés jellege (lágy, durva), repülési sebesség.

$$F_l = \frac{1}{2} \cdot C_l \cdot \zeta \cdot v^2 \cdot A, \quad (1)$$

ahol

F_l : a szárnyon ébredő felhajtóerő,

C_l : a felhajtóerő-tényező,

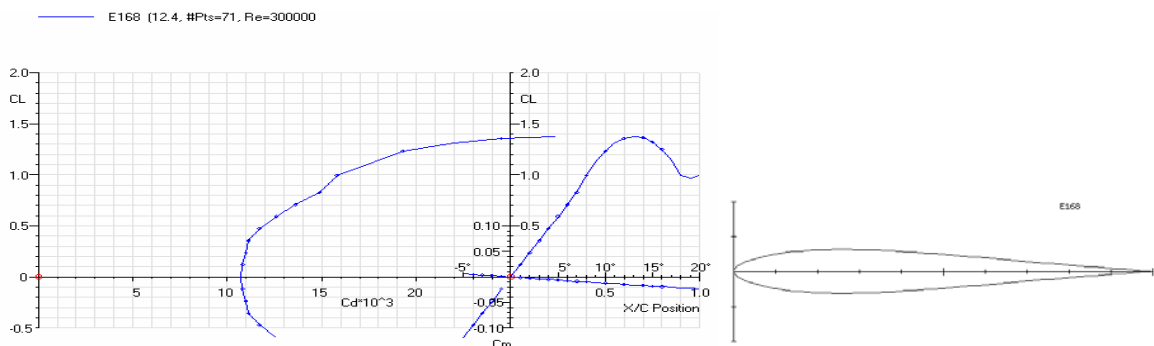
ζ : a levegő sűrűsége,

v : az áramló közeg sebessége [m/s] (a felülethez képest),

A : a szárny felülnézeti vetületének területe.

Az (1) összefüggés segítségével meghatározható egy adott szárnyon ébredő felhajtóerő. Ez az összefüggés nem számol a véges kiterjedésű szárnyakon keletkező járulékos hatásokkal. Az (1) összefüggés alapján számolt felhajtóerő értéke tehát egy elméleti maximumnak tekinthető, amit a valóságos szárnyak nem érhetnek el!

A 2.2. ábra egy szimmetrikus szárnyszelvény polárisát szemlélteti. Jól megfigyelhető, hogy nulla állásszög esetében a szárnyon közel nulla felhajtóerő keletkezik (bal oldali diagram), ugyanakkor a szelvénynek ekkor a legkisebb az ellenállása (jobb oldali diagram).



2.2. ábra: E168 szimmetrikus szárnyszelvény polárisa³³ és kontúrja³⁴

Ahol C_l : a felhajtóerő-tényező,

C_d : az ellenállás tényező,

C_m : a nyomatéki tényező.

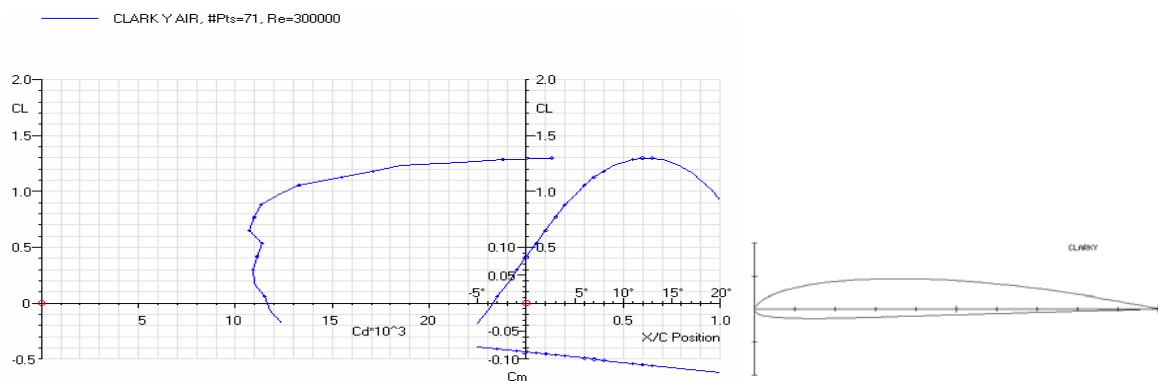
A szimmetrikus geometriából következik, hogy a szárny negatív és pozitív állásszögei esetében a felhajtóerő és az ellenállás is szimmetrikusan változik. Leolvasható

³³ A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András.

³⁴ Forrás: <http://www.nasg.com/afdb/list-airfoil-e.phtml> (2002.)

továbbá, hogy a szárny ± 5 fokos állásszög esetében hatásos. Ettől nagyobb állásszögek esetében már jelentősen növekszik az ellenállás. Tovább növelve az állásszöget 10 fok környékén már nem növekszik a felhajtóerő. Tovább növelve az állásszöget, 13 foknál a szárny ellenállása, a felületéről leváló örvények miatt akkorára növekszik, hogy bekövetkezik az átesés. A szimmetrikus geometria a szelvényt műrepülőgépek, illetve kormányfelületek építésére teszi alkalmassá.

A 2.3. ábrán egy aszimmetrikus szárnyszelvény³⁵ és annak polárisa³⁶ látható. A szimmetrikus szelvénnel ellentétben ez a profil nulla fokos állásszögnél is termel felhajtóerőt. A profil polárisa alapján látható, hogy az állásszögre kevésbé érzékeny. A profil ellenállása -5 és $+6$ fokos állásszögértékek között jelentősen nem változik. Tíz fok környékén, a profil ellenállása hirtelen növekszik, miközben a felhajtóerő már nem nő tovább. Ennek a profilnak $+12$ fok a kritikus állásszöge, ami azt jelenti, hogy ennél az állásszögnél következik be az átesés. A Clark-Y profil ellenállása minden állásszögnél nagyobb, mint az R140, szimmetrikus profilé, ami arra enged következtetni, hogy ez a profil „lassabb”. Ez azt jelenti, hogy a Clark-Y profillal épített robotrepülő alacsony sebességtartományban is repülőképés és manőverezhető marad. Ez lényeges szempont lehet, ha a repülő távirányítású, mivel a relatíve alacsony sebesség nem igényli a kezelő nagyon gyors reakcióit.



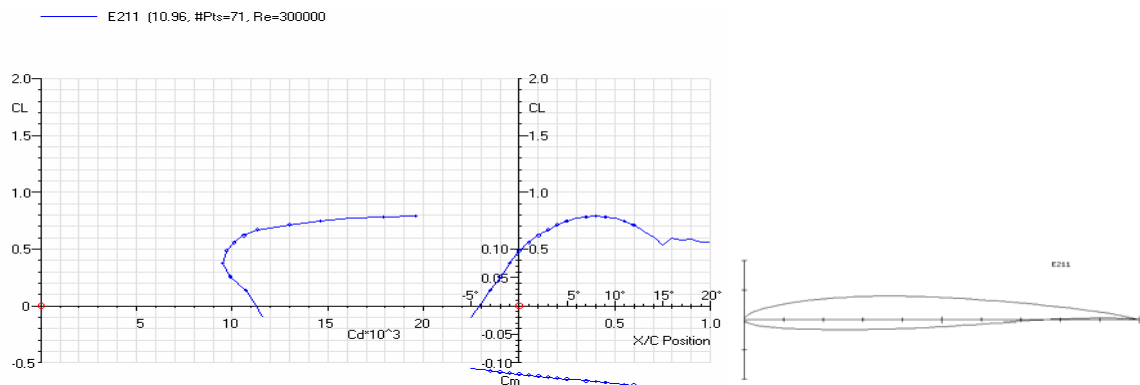
2.3. ábra: Clark-Y szárnyszelvény polárisa³⁶ és kontúrja³⁵

Más szavakkal ez a profil alkalmas trénergépek építésére. Ugyanakkor elmondható, hogy a Clark-Y profil viszonylag nagy ellenállása miatt gyenge siklási teljesítményt mutat. Amennyiben a cél, hogy a repülőgép motor nélkül is képes legyen jelentősebb távolságok megtételére, célszerű egy alacsonyabb ellenállású profilt választani.

³⁵ Forrás: <http://www.nasg.com/afdb/list-airfoil-e.phtml> (2002.)

³⁶ A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András.

A 2.4. ábrán³⁷ az (Eppler) E211 profil látható. Ennek érdekessége, hogy az alja enyhén homorú. A Clark-Y profilhoz képest az E211-nek kisebb rádiuszú a belépő kialakítása. A polárison³⁸ látható, hogy ellenállás-tényezője is alacsonyabb, ami kedvező. Ugyanakkor az E211 profil felhajtóerő-tényezője lényegesen kisebb a Clark-Y profilhoz viszonyítva. A profil -3 és $+4$ fok közötti állásszögeknél hatékony. Az E211 érdekes tulajdonsága, hogy átesése nem hirtelen következik be. A 2.4. diagram³⁸ alapján látható, hogy az állásszöget $+4$ fokról $+8$ fokra növelhetjük, miközben a felhajtóerő már csak alig növekszik. Ezzel egy időben jelentősen növekedni kezd a profil ellenállása. Ezek alapján arra lehet következtetni, hogy az Eppler211 profil nagyobb sebességgel repülhet, de az állásszög növelésével teljesítménye jelentősen romlik.



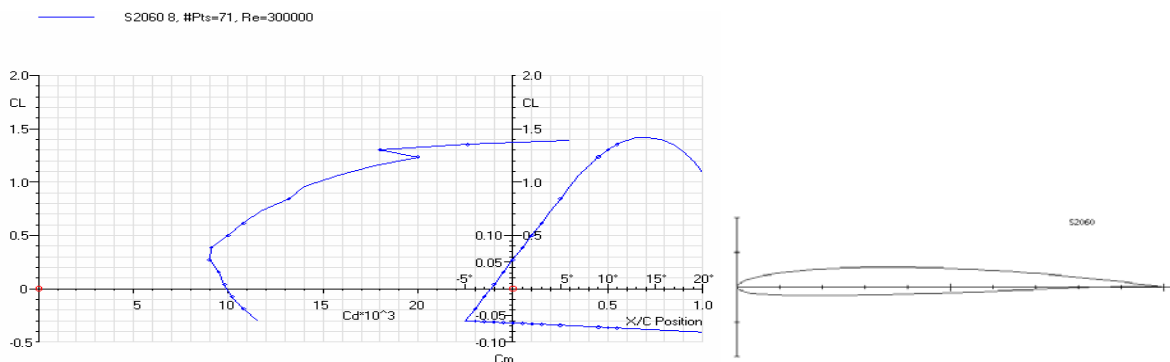
2.4. ábra: E211 szárnyszelvény polárisa³⁸ és kontúrja³⁷

A repülési sebesség növelése érdekében a szelvény íveltségét, illetve „vastagságát” kell csökkenteni. A 2.5. ábra egy viszonylag gyors szelvényt, és annak polárisát ábrázolja. A diagramból kiolvasható, hogy ennek a szelvénynek a felhajtóerő-tényezője kisebb, mint a Clark-Y profilé. Más szavakkal, ahhoz, hogy a Clark-Y profillal megegyező mértékű felhajtóerő termelődjön az (Selig) S2060 profilon vagy nagyobb állásszögre, vagy nagyobb sebességre van szükség. Mivel az S2060 profil fajlagos ellenállása kicsi. Egységnyi motorteljesítmény esetén (vonóerő) ez a profil nagyobb sebességgel repül. A keskeny profilokra jellemzően az S2060 profil is érzékeny az állásszögre. A kedvezően alacsony ellenállás -2 és $+4$ fokos állásszög esetén valósul meg. Ugyanakkor kritikus állásszöge 13 fok, ami kedvezően magas érték. Ez azt jelenti, hogy bár az állásszög növelésével nő a profil ellenállása, átesés csak viszonylag későn következik be. Az alacsony fajlagos ellenállás értéke a speciálisan kialakított szelvénynek köszönhető. Ezek az úgynevezett

³⁷ Forrás: <http://www.nasg.com/afdb/list-airfoil-e.phtml> (2002.)

³⁸ A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András.

lamináris profilkok úgy lettek kialakítva, hogy a szárny kilépő éle felé haladva az áramlás leválása (örvényképződés) a lehető legkésőbb (a lehető legközelebb a kilépő élhez) történjen meg. Ezt részben a keskeny profil, részben pedig, a profil „legvastagabb” részének az általában a húrhossz első harmadáról a húrhossz közepére tolásával érhető el. Ez a kialakítás teszi lehetővé a szelvény felületének jelentős részén a zavartalan lamináris áramlást. Ennek következtében a lamináris szelvényekkel készült szárnyak felületi simasága rendkívül fontos.



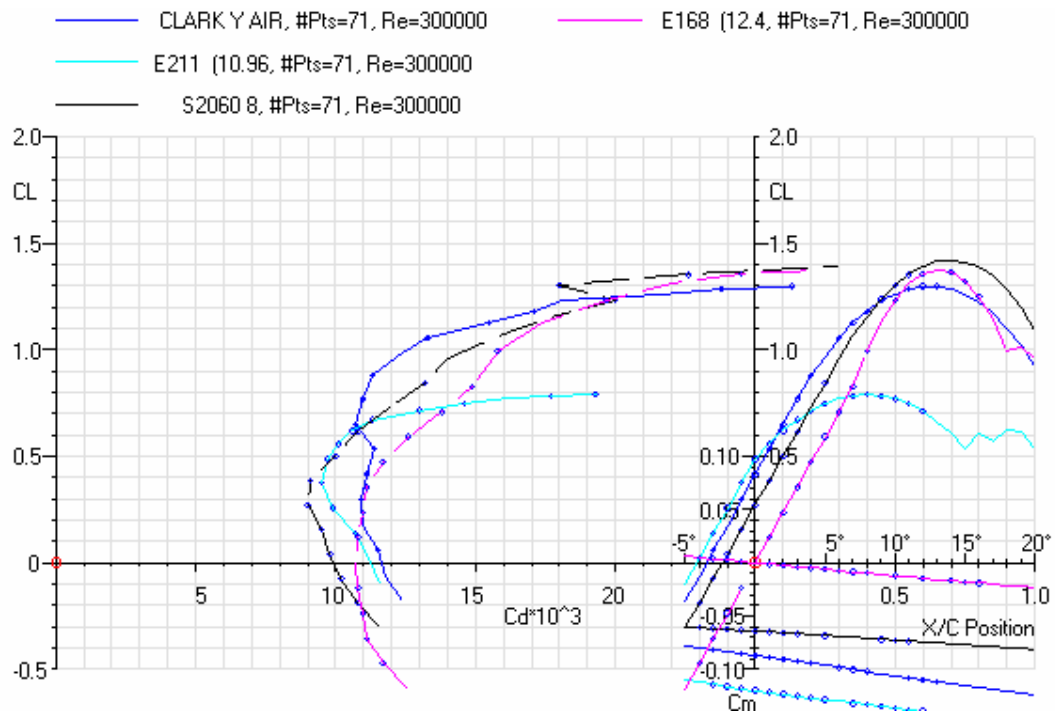
2.5. ábra: S2060 szárnyszelvény polárisa³⁹ és kontúrja⁴⁰

A 2.2. diagram összesítve szemlélteti a fent tárgyalt szárnyszelvények jellemzőit. A szélcsatorna szimulátor alkalmas szárnyszelvények gyors és hatékony összehasonlítására. Segítségével kiválasztható olyan szelvény, amely a robotrepülőgép tervezett jellemzőit a lehető legnagyobb mértékben kielégíti. A 2.2. diagram példáján látható, hogy az E211-es szelvény kritikus állásszöge kedvezőtlenül alacsony, ami a robotrepülőgép átesésének kockázatát növeli.

A sebesség növelésének, illetve a repülés energiaszükségletének további csökkentése érdekében ismertek olyan eljárások, melyek tovább növelik a határréteg lamináris tartományát a szárny mentén. Ilyen eljárás a határréteg elszívás. Az elszívás lényege, hogy a szárny felületén apró furatok találhatók, amiken keresztül történik a szárny belsejébe a levegő elszívása. Az elszívás hatására a kialakuló örvények megszűnnek, tovább növelve a lamináris tartományt.

³⁹ A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András.

⁴⁰ Forrás: <http://www.nasg.com/afdb/list-airfoil-e.phtml> (2002.)



2.2. diagram: Szárnyszelvények polárisainak összehasonlítása⁴¹

A határréteg elszíváshoz hasonló módszer a határréteg lefúvás. Ennek lényege, hogy a felület azon részein, ahol leghamarabb megindul az örvényképződés, megfelelően kialakított nyílásokon keresztül a szárnyból kifelé levegőt fújnak. A kifúvott levegő sebessége nagyobb, mint a felület adott részén természetesen kialakuló sebesség, így újra lamináris áramlás alakulhat ki.

2.1.1. Átesés

A szárnyprofilok elemzése során a polárdiagramok alapján meghatározható egy szelvény kritikus állásszöge. A kritikus állásszögnél nagyobb szögű megfúvás esetén a szelvény ellenállása növekszik, miközben a felhajtóerő erősen lecsökken. Ez az átesés jelensége.

Az analitikus elemzés során feltételeztük, hogy az állásszög változása állandó sebesség, pontosabban változatlan Reynolds-szám mellett történik. Valóságos esetben az állásszög változása a szárny körül áramló levegő sebességének a változását is okozza, ami kihatással van az áramlás minőségére.

⁴¹ A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András.

2.1.2. Reynolds-szám

Osborne Reynolds (1842 - 1912) egyik felismerése az áramlástan kapcsán az volt, hogy a geometriailag hasonló testekre ható légerők arányosak, ha az áramlás képe hasonló, azaz, ha a levegőrészecskére ható tehetetlenségi és súrlódási erők hányadosa azonos. Ez a hányados a Reynolds-szám.

A Reynolds-szám egy dimenzió nélküli viszonyszám. Kiszámítási módja bonyolult, de rendelkezésre áll gyakorlati szempontból jól használható közelítő formula (2).

$$Re = \frac{v \cdot t}{\nu} \quad [10], \quad (2)$$

ahol

Re : a Reynolds-szám,

v : az áramló közeg sebessége [m/s] (a felülethez képest),

t : a szelvény húr hossza [m],

ν : a kinematikus nyúlóssági tényező.

További egyszerűsítés után a közelítő formula az alábbiak szerint alakul (3):

$$Re = 7000 \cdot v \cdot t, \quad (3)$$

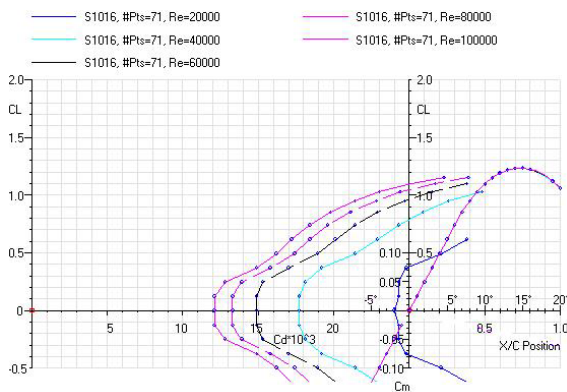
ahol az $\frac{1}{\nu}$ értékét helyettesíthetjük 7000-el!

A Reynolds-szám azért lényeges, mert segítségével egyszerűen magyarázható az az ismert tény, hogy egy jól bevált repülőgép kicsinyített modelljének repülési képessége messze alulmarad az eredeti gépéhez képest.

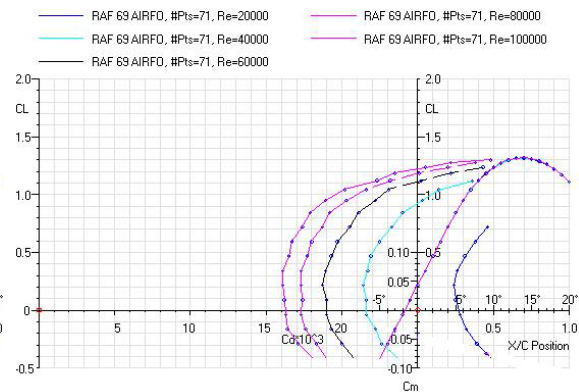
A 2.3. diagram⁴² egy lamináris profil ellenállását szemlélteti négy különböző Re tartományban. Megfigyelhető, hogy $Re=100000$ esetében, ± 2 fokos állásszög tartományban az ellenállás tényező igen kedvezően alakul. A görbesereget szemlélve látható, hogy alacsony Re tartományban az ellenállás tényező rohamosan csökken.

A 2.4. diagram⁴² a 2.3-mal megegyező feltételek mellett ábrázolja egy viszonylag „vastag” (20,6%) szimmetrikus profil ellenállását négy különböző Re tartományban. Látható, hogy alacsony Re érték esetében ($Re=20000$) a profil ellenállás tényezője rendkívül kedvezőtlen.

⁴² A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András.



2.3. diagram: Egy lamináris profil ellenállásának változása a Reynolds-szám függvényében



2.4. diagram: Egy „vastag” szimmetrikus profil ellenállásának változása a Reynolds-szám függvényében

Összehasonlítva az „S1016” lamináris profilt a „RAF69” profillal elmondható, hogy a RAF69 profil már $Re=40000$ esetében kedvezőtlenül nagy ellenállást képvisel, míg ugyanennél a Re értéknél az S1016 profil még alkalmazható.

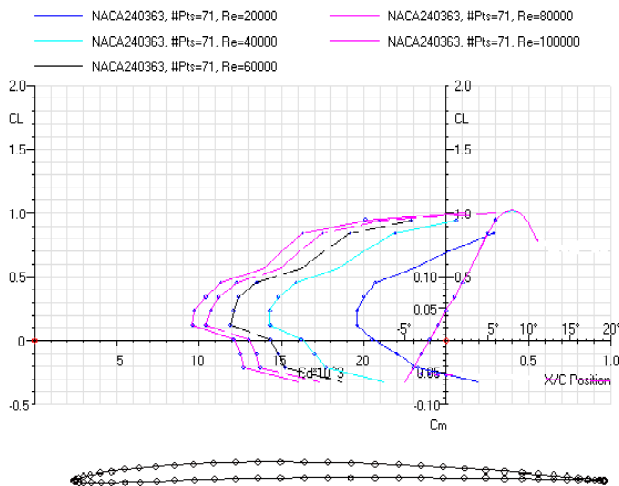
Ha a szelvény felületén vizsgáljuk az áramlás jellegét, azt tapasztaljuk, hogy állandó állásszög mellett az áramlás sebességét csökkentve a határréteg közelében egyre vastagodó turbulens zóna keletkezik. Ez a turbulens zóna a sebesség csökkenésével egyre hamarabb képződik a szárny belépő éléhez viszonyítva. Mivel a turbulens áramlás növeli a szárny ellenállását, a szelvény teljesítménye csökken. Amikor a leválás eléri a szelvény legvastagabb pontját, a szelvény ellenállása hirtelen megnő. Ehhez a sebességhez tartozó Reynolds-számot nevezzük „kritikus Re -szám”-nak. A 2.6. ábrán⁴³ két, különböző Re érték esetében kialakuló turbulens réteg látható. A turbulens zóna a szelvény körvonala és a zöld határvonal között alakul ki. Jól látható, hogy alacsony Re értéknél a turbulens zóna „vastagsága” nagyobb, ami abból következik, hogy a kisebb áramlási sebességgel mozgó levegő részecskék nem képesek a szelvény felületét követni, így hamarabb leválnak róla.

Különbőféle szelvényeknek eltérő a kritikus Reynolds-száma, így tervezés során, ismerve a repülőgép főbb paramétereit (az egyszerűsített összefüggés alapján (3) a sebesség és a szárnymélység), kiválasztható olyan szelvény, amely megfelel a kitűzött



2.6. ábra: Szárnyszelvény felületén kialakuló turbulens réteg különböző Re értékek esetében⁴³

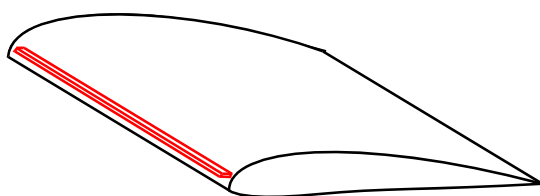
⁴³ A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András



2.5. diagram: Egy vékony profil ellenállásának változása a Reynolds-szám függvényében⁴⁴

vastagságú profil ellenállását szemlélteti négy különböző Re érték esetében. Látható, hogy ez a profil még Re=20000 esetében is kedvezőbb ellenállással rendelkezik, mint a RAF69 profil Re=40000 esetében (2.4. diagram). Kísérletekkel igazolható, hogy ha a szárny belépő élénél már turbulens áramlást alakítunk ki, akkor ez a vékony turbulens réteg meglepően sokáig követi a profil felületét anélkül, hogy a réteg vastagodni kezdene. Kísérletekkel igazolható, hogy a belépőélen keltett turbulens áramlás késlelteti a leválást a zavartalan áramlású megfűváshoz képest [10].

A turbulens határréteg repülésre gyakorolt hatásának felismerése vezetett az úgynevezett „turbószál”, vagy „turbóléc” alkalmazásához. Ennek lényege, hogy a szárnyon, a belépőél mentén (előtte, vagy a kicsivel felette a szárnyon) egy vékony szálát

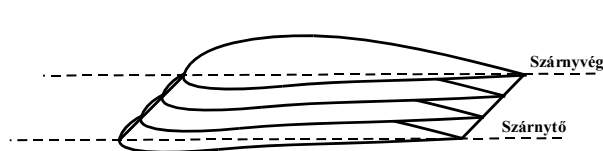


2.7. ábra: Turbóléc a szárnyon⁴⁵

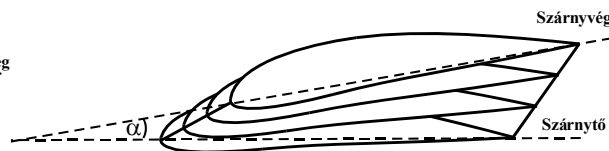
feszítenek ki, vagy a szárny felületére ragasztanak fel (2.7. ábra⁴⁵). Ezzel a módszerrel jelentősen le lehet csökkenteni a kritikus Re értéket, így szükség esetén lassú gépekhez is használható mechanikai megfontolásból vastagabb szárnyprofil.

⁴⁴ A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András.

⁴⁵ Az ábrát készítette Molnár András.



2.8. ábra: Elcsavarásmentes szárny⁴⁶



2.9. ábra: α szöggel elcsavart szárny⁴⁶

2.1.3. Szárnyak elcsavarása

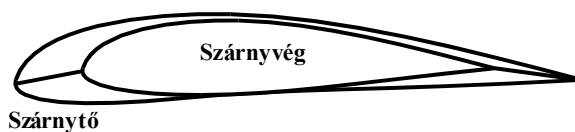
Az eddigi vizsgálatok egy elméletileg végtelen szárny körüli áramlásra vonatkoztak. Az átesés folyamata a végtelen hosszú szárnyakon, a szárny tetszőleges metszetét választva, időben azonos módon zajlik le. Ez azt jelenti, hogy az átesés a teljes szárnyon azonos időpillanatban és módon következik be.

Stabilitási szempontból ez igen kedvezőtlen, hiszen az átesés pillanatától mindaddig, míg a szárnyat nem éri megfelelő sebességű és irányú megfűvás, a felületen hatásos kormányerők sem keletkeznek (például hatástalan a csűrőkormány). Amennyiben az átesés a teljes szárnyfelületen egy időben következik be, a repülőgép úgynevezett dugóhúzóba kerül, ami dinamikus stabil repülési helyzet! A dugóhúzó fenntartása nem igényel kormányzást (ezért általában nem is számít műrepülő figurának). Rosszul megkonstruált repülők esetében az önfenntartó pörgő zuhanás végzetes lehet.

Az átesés kialakulásának ismeretében kézenfekvő megoldás a szárnyvégek negatív elcsavarása (2.8-2.9. ábrák⁴⁶). Mivel most a szárny hossza mentén haladva (a törzstől a szárnyvég felé) minden egyes szelvény állásszöge a szárnytőben mért állásszöghöz képest egy kicsivel kisebb (általában a szárnyvég elcsavarása 2-4 fok), az átesés a szárnytőnél alakul ki, miközben a szárnyvég még zavartalanul repül.

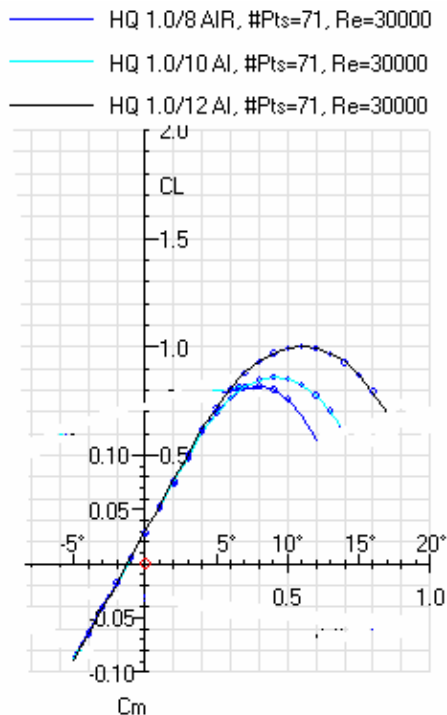
Az elcsavart szárny átesése lassabb folyamat és mivel nem a teljes felületen megy végbe, a repülőgép hatásosan kormányozható marad.

Az elcsavarás előidézhető aerodinamika úton is (2.10. ábra⁴⁶). Ennek lényege, hogy a szárny hossza mentén haladva, a törzstől a szárnyvég felé folyamatosan változik a metszet. Az aerodinamika elcsavarás hatása megegyezik a mechanikai elcsavarás hatásával, de áramlástanai szempontból kedvezőbb. Az aerodinamikai elcsavarás mechanizmusa 2.6. diagram alapján értelmezhető. A diagram három, azonos



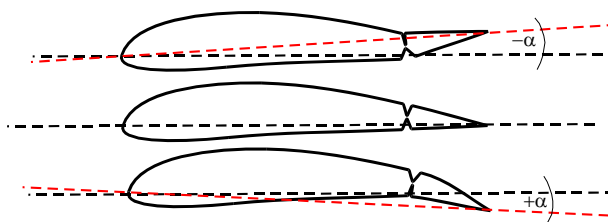
2.10. ábra: Aerodinamikai elcsavarású szárny⁴⁶

⁴⁶ Az ábrát készítette Molnár András.



2.6. diagram: A profil vastagságának hatása a kritikus állásszögre⁴⁷

A fentiek ismeretében érdekes megállapítások tehetők. A kisméretű repülőgépeken gyakran alkalmaznak úgynevezett szalagsűrőt. Ez gyakorlatilag a szárny teljes hosszában elhelyezett, mechanikailag összefüggő kormányfelület. Ennek a megoldásnak általában előnye az, hogy a csűrők mozgatása megoldható egyetlen, a szárny közepén elhelyezett szervómotorral. Előfordul azonban (főleg nagyobb modelleknél), hogy a kedvezőbb szervóterhelések miatt a szalagsűrővel épített gépeken, egy-egy szervó mozgassa a jobb és a bal csűrőt. A modern távirányítókön beállítható olyan komplex szervómozgás, amivel



2.11. ábra: Az ívelés hatása a szárny állásszögére⁴⁹

2.11. ábra⁴⁹ alapján könnyen beláthatjuk. A hirtelen megnövekedett állásszöggel könnyen elérhetjük, sőt meg is haladhatjuk az adott szárny kritikus állásszögét, ami azonnali áteséshez vezet! Ez azért különösen veszélyes, mert ívelni a szárnyat általában leszállásnál

családból származó profil állásszög-felhajtóerő-tényező függvényét szemlélteti⁴⁷. A három profil között vastagságban van különbség (8%, 10%, 12%). A szelvény átesése a függvény legmagasabb pontjához tartozó állásszög értéknél következik be. Látható, hogy minél vastagabb a profil, az áteséshez tartozó kritikus állásszög, annál nagyobb. A HQ108 profinnál a maximális állásszög értéke 8 fok, a HQ1010 profinnál 9 fok, míg a HQ1020 profinnál 11 fok.

Amennyiben a szárnykonstrukció olyan, hogy a szárnytőnél vékony, míg a szárnyvégnél vastag metszetet használunk, kialakul a negatív elcsavaráshoz hasonló hatás, azaz a szárnyvég átesése később következik be, mint a szárnytő átesése.

nemcsak csűrni, de ívelni is lehet a szárnyat!

A teljes szárny ívelése (mindkét szalagsűrő lefelé mozgása) a szárny állásszögének növelését jelenti⁴⁸! Ezt a

⁴⁷ A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András.

⁴⁸ Jelen esetben – a szakirodalomban használt értelemben – a szárny állásszöge alatt a szárny húrja és az azt körülvevő zavarmentes légáramlat irányvektora által bezárt szöveget értjük (lásd 2.1. ábra) [19].

⁴⁹ Az ábrát készítette Molnár András.

kell. A földközélemben bekövetkezett átesést már nem lehet korigálni így az általában a gép törését jelenti.

Szalagsűrős gépek esetében a leszálláskor szükséges fékhatást (ha feltétlenül szükséges) felfelé íveléssel célszerű megvalósítani. A felfelé ívelt szárny felhajtóerő tényezője csökken, miközben az ellenállása nő, ugyanakkor csökken az állásszöge.

Amennyiben a szárny osztott kormányfelületekkel rendelkezik, a szárnytőhöz közelebb eső felületet célszerű ívelő felületnek használni, míg a szárnyvég felé eső felületet célszerű csűrőnek használni. Ebben az esetben a szárnytő közeli felület ívelése automatikusan létrehoz a szárnyon egy negatív elcsavarást, hiszen az ívelt szárnyrész állásszöge megnő, miközben az íveletlen külső szárnyrész állásszöge változatlan marad.

Tovább növelhető a fékhatás, ha a szárnyon az osztott kormányfelületek törzshöz közelebbi egységét lefelé, és ezzel egy időben a csűrőket (szárny külső szekciója) felfelé íveljük. Természetesen a csűrők felfelé ívelése közben továbbra is megmarad a csűrő funkció! Nagy fesztávú vitorlázó modelleken ez az úgynevezett „madárfék” gyakran alkalmazott hatékony megoldás.

2.2. Stabilitás

A repülőgépek stabilitása alatt értjük azt a tulajdonságot, hogy a gép a külső zavaró hatásokat beavatkozás nélkül igyekszik kompenzálni. Ezt a képességet (stabilitást) külön értelmezzük a repülőgép minden szabad mozgási tengelyére (függőleges tengely körüli forgás, bólintó vagy keresztengely körüli forgás és orsózó vagy hosszengely körüli forgás). Ennek megfelelően lehet, hogy a repülőgép orsózó irányban stabil (igyekszik vízszintes szárnyakkal repülni), de hossz-stabilitása gyenge (rövid törzsű gépekre jellemző), így állandó korrekciót igényel. Külső nézőpontból figyelve a légkör turbulenciája megváltoztatja a repülőgép addigi helyzetét (pl.: stabil siklás). Ez a hatás a gépet irányváltatásra készítheti. A stabil repülőgép mindennemű beavatkozás nélkül képes a zavarást megelőző repülési állapotba visszajutni. A stabilitás vizsgálata során feltétlenül figyelembe kell venni a kormányozhatóságot is. A repülőgép kormányozhatósága alatt a gép azon képességét értjük, amely a kormányfelületek (vagy egyéb kormányzást biztosító mechanizmusok) hatására a gépet képes kimozdítani addigi állapotából. Ebből következik, hogy a stabilitás és a kormányozhatóság egymással ellentétes tulajdonságot jelent!

A stabilitás általánosan használt matematikai megfogalmazása egy adott tengelyre a (4)-es összefüggés formájában írható le.

$$-\frac{\partial m_a}{\partial C_y} > 0, \quad (4)$$

ahol

∂m_a : a nyomatéki tényező változása, ahol „a” az adott tengely indexe,

∂C_y : a felhajtóerő-tényező változása.

Az (5)-ös összefüggés a repülőgép hossz-stabilitását írja le. Definíció szerint az orrkönnyű nyomatékot nevezük pozitív nyomatéknak. Ennek megfelelően a stabilitás követelménye megfogalmazható az alábbiak szerint:

Hossztengelyre stabil a repülőgép, ha az állásszög-növekedés, a felhajtóerő-tényező vagy a vízszintes sebesség csökkenésének hatására orrnehéz, azaz negatív bólintó nyomaték keletkezik.

$$-\frac{\partial m_z}{\partial C_y} > 0 \quad [23], \quad (5)$$

ahol

∂m_z : a hossz tengely nyomatéki tényező változása.

A stabilitás vizsgálata visszavezethető eredő vektorok támadáspontjai által számított nyomatékokra. A (6)-os összefüggés a nyomásközéppont, a súlypont, valamint az ekvivalens húr segítségével határozza meg a hossz-stabilitás mértékét.

$$\frac{X_N - X_S}{h_A} = -\frac{\partial m_z}{\partial C_y} \quad [23], \quad (6)$$

ahol

X_N : a semleges pont⁵⁰ távolsága a nyomásközépponttól (AC),

X_S : a súlypont távolsága AC-től,

h_A : az ekvivalens aerodinamika húr⁵¹.

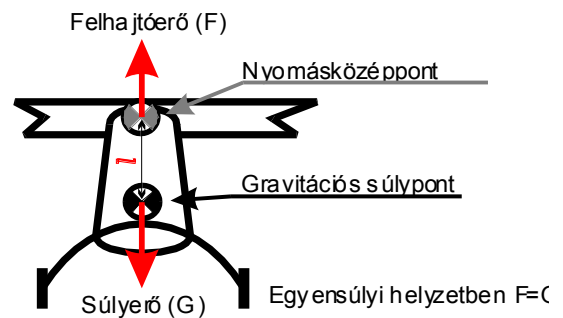
A stabilitás tárgyalása során meg kell különböztetnünk *statikus stabilitást*, valamint *dinamikus*, vagy *aerodinamikai stabilitást*.

⁵⁰ Semleges pont alatt az az elméleti pont értendő, ahova a súlypontot helyezve a repülőgépen a zavarások hatására a visszatérítő nyomaték értéke 0.

⁵¹ Az adott szárnyhoz tartozó téglalap alakú, „V” törés nélküli, az eredetivel aerodinamikailag egyenértékű szárny húrja.

2.2.1. Statikus stabilitás

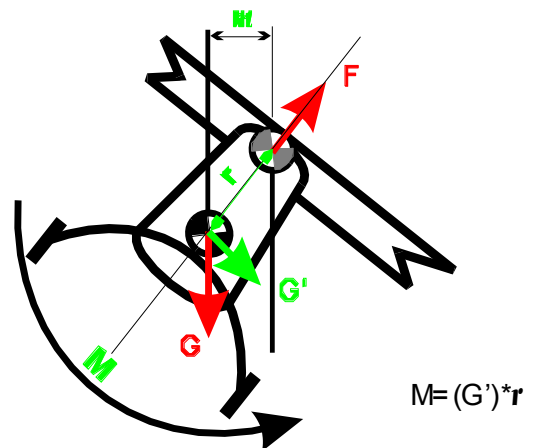
Statikus stabilitásról akkor beszélünk, ha a repülőgépet, mint merev testet vizsgáljuk, és figyelmen kívül hagyjuk a repülés során fellépő egyéb erőhatásokat. Statikusan akkor mondunk stabilnak egy repülőgépet (az adott tengelyre nézve), ha kibillentve azt eredeti állapotából (megdöntve), kimutatható egy olyan erőhatás, amely visszaállítani igyekszik a gépet. A jobb érthetőség érdekében az orsózó mozgásra mutat példát a 2.12. és a 2.13. ábra⁵².



2.12. ábra: A hossz tengely körüli elfordulás vizsgálatánál fellépő erők stabil repülési helyzetben⁵²

A 2.12. ábra szemből nézve szemlélteti a repülőgépen fellépő erőket stabil repülés esetén. Az ábrán egy felsőszárnyas gép vázlatos rajza látható, ami stabilitás szempontjából kedvező konstrukció. Látható, hogy a repülőgép tömegközéppontja (gravitációs súlypont) nem esik egybe a felhajtóerő támadáspontjával (nyomásközéppont). Ennek stabil repülés során nincs különösebb jelentősége, mégis a statikus stabilitás kulcseleme!

A 2.13. ábra⁵² egy külső zavaró hatástól megdőlt repülőgépet szemléltet. Látható, hogy a két, egymással egyensúlyt tartó erőpár (F és G) súlyerő komponense felbontható az erő támadáspontját összekötő egyenesre merőleges (G'), valamint azzal párhuzamos (az ábrán nincs jelölve) összetevőkre. A G' erőkomponens, r erőkarokon keresztül, M forgatónyomatékokat kelt. Fontos észrevenni, hogy a keletkező forgatónyomaték épp a stabil repülési állapot visszaállítása irányába



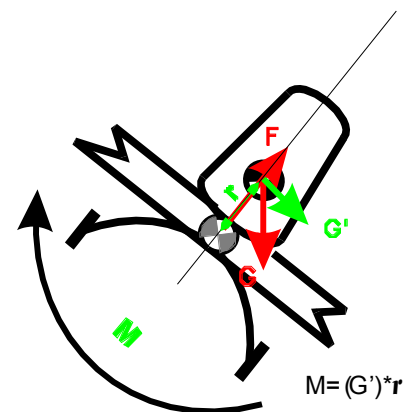
2.13. ábra: Külső zavarás hatására megdőlt repülőgép esetében fellépő erők és nyomatékok⁵²

igyekszik a repülőt mozgatni! Az ábra alapján az is belátható, hogy az M forgatónyomaték mértéke a két erő (F és G) támadáspontjainak távolságától függ. Minél nagyobb ez a távolság (l), annál nagyobb M értéke, azaz annál stabilabb a repülőgép. Megjegyzendő, hogy „ l ” növelése a szárny „ V ” törésével is megvalósul. Az ilyen szárnykialakításnak további stabilizáló hatása is van, mely lényegesen nagyobb hatású, mint a

⁵² Az ábrát készítette Molnár András.

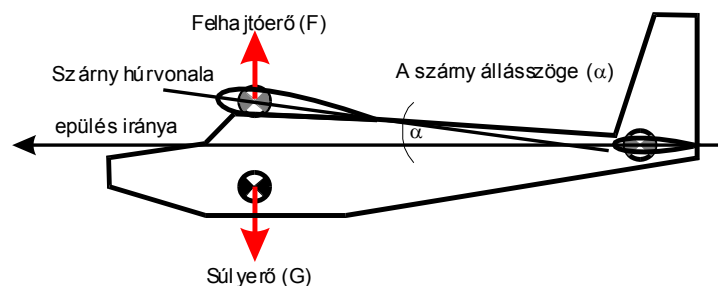
nyomásközéppont és a súlypont távolságának növekedéséből származó hatás (aerodinamika stabilitás). A fentiek alapján érthető, hogy a gyakorló, illetve tanulógépek miért felsőszárnyas konstrukciók. A 2.13. ábra⁵² alapján megállapítható továbbá, hogy az M értéke függ F és G értékétől is. Minél nagyobb G (minél nehezebb a repülőgép), annál nagyobb lesz M . Ez azt jelenti, hogy a repülőgép tömege is növeli a stabilitást. Többek között ezért tapasztalható az a jelenség, hogy a kisebb modellek sokkal érzékenyebbek a légköri zavarokra, mint a nagyobbak. Természetesen a nagyobb tömeg nagyobb motorteljesítményt igényel. Mivel a fokozott motorteljesítményt más hasznos célokra is fel szeretnénk használni (hasznos terhek szállítása, repülőgép emelkedési, manőverezési képességeinek javítása stb.), a tömeg növelését nem alkalmazzuk stabilitás növelésére.

A 2.14. ábrán⁵³ egy alsószárnyas repülőgép zavarástól megdőlt vázlatos rajza látható. Az eddig megismertek alapján meghatározhatók a fellépő erők és nyomatékok, de ebben az esetben a forgatónyomaték (M) a dőlés irányába hat! Tehát a 2.14. ábrán⁵³ vázolt repülőkonstrukció statikus szempontból instabil!



2.14. ábra: Külső zavarás hatására megdőlt, alsószárnyas repülőgép esetében fellépő erők és nyomatékok⁵³

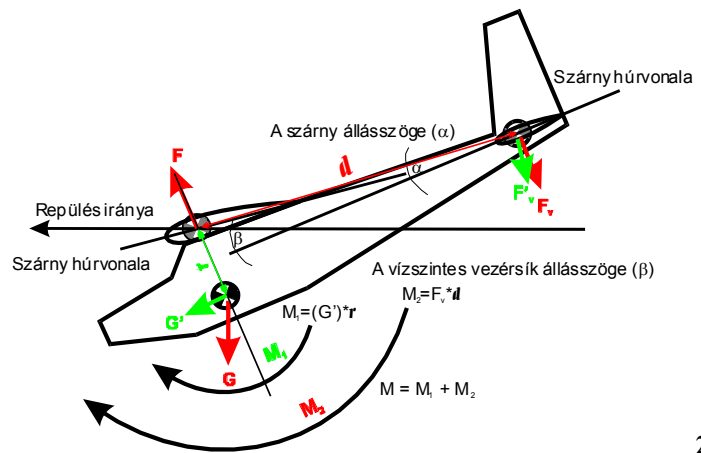
A repülőgép hossz-stabilitását a 2.15. és a 2.16. ábrák⁵³ alapján a következőképpen lehet értelmezni. A 2.15. ábrán⁵³, egy repülőgép oldalnézeti vázlatán a stabil repülés során fellépő erők láthatók (a stabilitás szempontjából indifferens erőket nem ábrázoltam). Lényeges kiemelni, hogy a stabil vízszintes repülés során a farokrész vízszintes felületén az ábra szerint nem keletkezik felhajtóerő (a farokfelületen megjelenő felhajtóerő nem befolyásolja a stabilitás elvi megértését, de a könnyebb érthetőség érdekében érdemes neutrális, azaz felhajtóerőmentes állapotot feltételezni.). A 2.16. ábrán külső zavaró hatástól hosszirányban megdőlt repülőgépen fellépő erők és nyomatékok láthatók. A hosszirányú stabilitást két tényező is befolyásolja. A gravitációs tömegközéppont és a



2.15. ábra: A keresztengely körüli elfordulás vizsgálatánál fellépő erők stabil repülési helyzetben⁵³

⁵³ Az ábrát készítette Molnár András.

nyomásközéppont eltérő helyzetéből adódóan keletkezik M_1 forgatónyomaték, mely igyekszik visszaállítani a repülőgép eredeti helyzetét. Hagyományos kialakítású repülőgépek esetében ez a nyomaték viszonylag kicsi a vezérsík által létrehozott nyomatékkal szemben. A 2.16. ábrán⁵⁴ látható, hogy a megdőlt repülőgép vízszintes vezérsíkján megjelenő F_v erő F'_v komponense (F'_v merőleges a nyomásközéppontot és a vízszintes felület nyomásközéppontját összekötő egyenesre) M_2 forgatónyomatékot kelt. Az M_2 nyomaték d erőkaron keletkezik, melynek nagysága a repülőgép hosszától függ. Könnyű belátni, hogy hagyományos repülőgép konstrukció esetében M_2 lényegesen nagyobb M_1 -nél. Gyakorlati szempontból azt lehet mondani, hogy stabil lesz az a repülőgép, melynek hosszú a törzse, pontosabban a szárny és a vízszintes vezérsíkok egymástól való távolsága nagy. A rövid törzsű gépek hosszstabilitása kisebb, így azokat általában folyamatos korrekcióval kell vízszintes repülési pályán tartani. A 2.16. ábra⁵⁴ alapján további két erő is szerepet játszik a visszatérítő nyomaték (M) értékének meghatározása során. Az ábrán nincsenek jelölve a törzsön keletkező közegellenállásból származó erők. A törzs orr-részén (az orrtól a súlypontig terjedő rész) keletkező erő az M_1 és M_2 nyomatékokkal ellentétes irányú nyomatékot hoz létre (M_A), amely éppen a stabilitás ellen hat! Természetesen a törzs további szakaszán is keletkezik közegellenállásból származó erő, melynek nyomatéka azonos értelmű az M_1 és M_2 nyomatékokkal (M_B).



.16. ábra: Zavaró hatásra a kereszttengety körül lebólintó repülőgépnél fellépő erők és nyomatékok⁵⁴

A függőleges tengely körüli stabilitás az imént vázolt hossztengety körüli stabilitáshoz hasonlóan értelmezhető, de visszatérítő nyomaték a függőleges vezérsíkon keletkező erő hatására keletkezik. A függőleges stabilitás esetében az eltérő tömegközéppontnak és nyomásközéppontnak nincs szerepe.

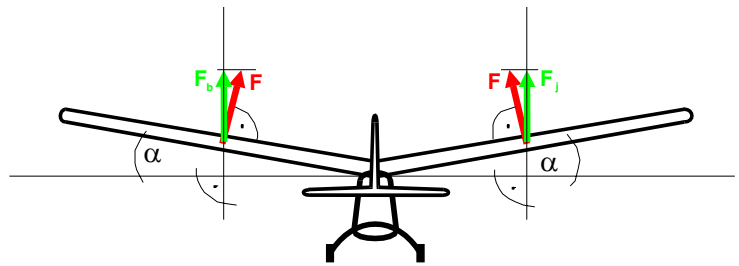
2.2.2. Aerodinamikai stabilitás

Az aerodinamikai stabilitás vizsgálata során a légerők változásaiból fakadó hatásokat elemezzük. Aerodinamikusan akkor mondjuk stabilnak a repülőgépet, ha azon a

⁵⁴ Az ábrát készítette Molnár András.

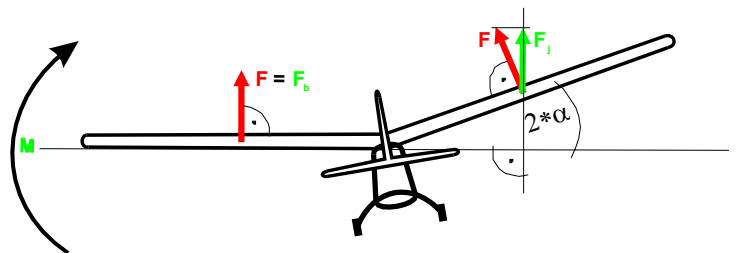
külső zavaró hatásra olyan légerők keletkeznek, melyek visszaállítani igyekeznek a stabil repülési állapotot.

Igen gyakran alkalmazott és egyszerűen kivitelezhető stabilitást növelő a szárny enyhe „V” törése. A 2.17. ábra⁵⁵ alapján jól érthető a stabilizáló hatás létrejötte. Vízszintes repülés esetén a repülőgép mindkét



2.17. ábra: Az α szögben megtört repülőgép szárnyain keletkező felhajtóerő⁵⁵

szárnyán (jobb és bal szárny) azonos nagyságú felhajtóerő keletkezik ($F_j = F_b$). Az ábra alapján látható, hogy a szárnyakon keletkező felhajtóerő valamivel kisebb (pontosan: $F_j = F \cdot \cos(\alpha)$), mintha ugyanaz a szárny „V” törés nélkül repülne. A zavaró hatástól megbillent repülőgép szárnyai eltérő mértékben dőlnek. A 2.18. ábra⁵⁵ szerint a bal szárny éppen vízszintes, miközben a jobb szárny $2 \cdot \alpha$ szöget zár be a vízszintessel. Ebben az esetben a jobb és a bal szárnyon eltérő nagyságú felhajtóerő keletkezik. A bal szárnyon a felhajtóerő nagysága éppen F , a jobb szárnyon pedig éppen $F \cdot \cos(2\alpha)$. Mivel $F > F \cdot \cos(2\alpha)$, a repülőgép hossz tengelye körül M forgatónyomaték ébred, ami éppen a zavaró hatás ellen hatva igyekszik a repülőt az eredeti pozícióba visszaforgatni.



2.18. ábra: Az α szögben megtört repülőgép szárnyain keletkező aszimmetrikus felhajtóerő⁵⁵

A „V” szárnytörés rontja a szárny teljesítményét. A megfelelő stabilitás és az elfogadható teljesítménycsökkenés, valamint a túlstabilizálás elkerülése érdekében a tervezők ritkán alkalmaznak 10-12 foknál nagyobb törést. Mivel a stabilizáló hatás a szárnyakon ébredő felhajtóerők különbségéből adódó forgatónyomaték által keletkezik, célravezető megoldás, ha a vízszintes szárnyat úgynevezett fülezéssel alakítjuk ki. Ebben az esetben a szárny körülbelül 2/3-a (a törzshöz közelebbi része) vízszintes, míg a fennmaradó 1/3-a (szárnyvég) viszonylag erősen (10 fok, vagy annál nagyobb) felfelé van törve. Ez a megoldás felhajtóerő tekintetében kedvezőbb teljesítményt mutat, ugyanakkor

⁵⁵ Az ábrát készítette Molnár András.

biztosítja a kellő stabilitást. Előfordulnak kombinált szárnykialakítások, ahol többszörös törésekkel biztosítják a stabil repülést.

2.2.3. A szárny törésének hatása az állásszögre

A szárny állásszögének jelentősége mind, a „Szárnyprofilok és hatásaik” mind, pedig az „Átesés”, valamint a „Szárnyak elcsavarása” című alfejezetek alapján nyilvánvaló. A repülőgépek stabilitásának vizsgálata során megfogalmazódott a szárnyak „V” vagy többszörös törésének stabilitást fokozó hatása.

A szárnyak „V” törése azonban befolyásolja a szárny állásszögét! A 2.17. ábrán látható, α szöggel megtört szárny állásszöge a szárnyközépen mért állásszögnél kisebb lesz!

Az állásszög csökkenés logikai úton könnyen belátható. Amennyiben egy törésmentes szárnyat vizsgálunk, aminek szárnyközépnél mért állásszöge φ , akkor nyilvánvaló, hogy ez a szög a szárny teljes hossza mentén φ . Abban az esetben, ha a szárnyat szárnyközépnél elkezdjük megtörni és a két félszárnyat függőlegesen egymás mellé állítjuk, a törés értéke 90° . 90° törés esetén nyilvánvaló, hogy mindkét félszárny állásszöge 0° . (Igaz, hogy ebben az esetben a repülőgép nem is repülöképes, de logikai okfejtéshez szükséges.) Mivel 0° -os törés esetében (vízszintes szárny) az állásszög φ , a törés mértékét fokozatosan növelve 90° -ig az állásszög lecsökken 0° -ra. Beláthatjuk, hogy 0° és 90° közötti szárnytörés esetében φ - 0° -ig változik az állásszög értéke.

A szakirodalom [10] alapján meghatározott összefüggés az alábbi:

$$\operatorname{tg}(\varphi^*) = \sqrt{\frac{1}{\sin^2(\varphi) \cdot \sin^2(\alpha) + \cos^2(\varphi)}} - 1 \quad [10], \quad (7)$$

ahol

φ^* : a szárny módosult állásszöge,

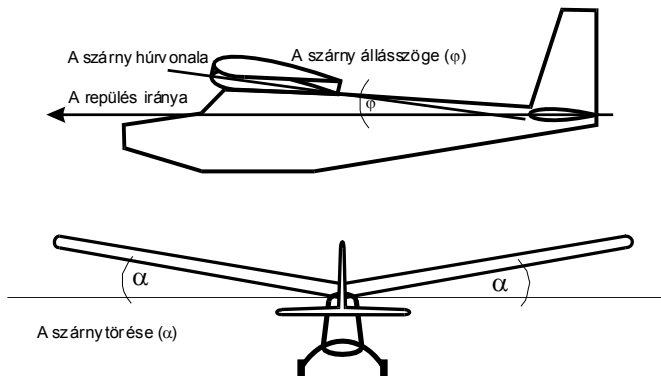
α : a szárny törésének mértéke (2.19. ábra),

φ : a szárny eredeti állásszöge (a törés vonalában mért állásszöge).

A fenti összefüggés indokolatlanul bonyolult. A többszörös szögfüggvények, valamint a négyzetgyök használat a kiszámítást bonyolulttá és pontatlanná teszi.

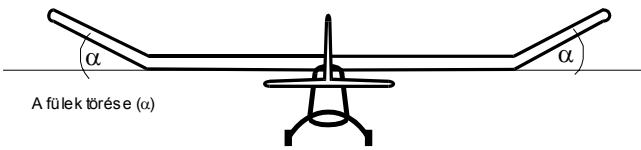
Az állásszög változását leíró összefüggés a (7) összefüggés, ekvivalens átalakításokat követően, az alábbiak szerint határozható meg:

$$\sin(\varphi^*) = \cos(\alpha) \cdot \sin(\varphi). \quad (8)$$



2.19. ábra: A szárny törésének állásszög változtató hatása⁵⁶

a törés állásszög csökkentő hatású, kijelenthetjük, hogy a fűlek állásszöge kisebb lesz, mint a szárny vízszintes (vagy kisebb szögben tört) szakaszáé. Ez azt jelenti, hogy a fűlezett szárny nemcsak a 2.18. ábrán értelmezett stabilizáló hatást biztosítja, hanem a szárny



2.20. ábra: Fűlezett szárnyú repülőgép⁵⁶

hajlamot.

2.2.4. Nyomásközéppont vándorlás

Az eddigi vizsgálatok során a nyomásközéppontot állandó helyzetűnek tekintettük. A nyomásközéppont valójában a szárnyszelvény körül kialakuló áramlási kép alapján számítható, vagy kísérletekkel mérhető nyomáseloszlásból meghatározható eredő nyomásvektor helye. Mivel a szelvény körül kialakuló áramlás – és így a nyomáseloszlás – a megfűvás szögétől, azaz a szelvény állásszögétől függ, az eredő nyomásvektor értéke és helye is változik! A nyomásközéppont változása szelvényre jellemző tulajdonság. Az irodalmak a nyomásközéppont vándorlásnál kifejezőbb nyomásközéppont vándorlásból származó nyomatékot (M) adják meg. A nyomatékot a szelvény húr hosszának (h) 25%-os referenciapontjára (jellemző nyomásközéppont, jelölése: AC) vonatkoztatva az alábbi összefüggéssel lehet meghatározni:

⁵⁶ Az ábrát készítette Molnár András.

$$M = C_m \cdot q \cdot A \cdot h \quad [2], \quad (9)$$

ahol

M : a légerők által kifejtett, állásszöggel változó nyomaték,

C_m : a nyomatéki tényező,

q : a torlónyomás,

A : a szárny alaprajzi területe,

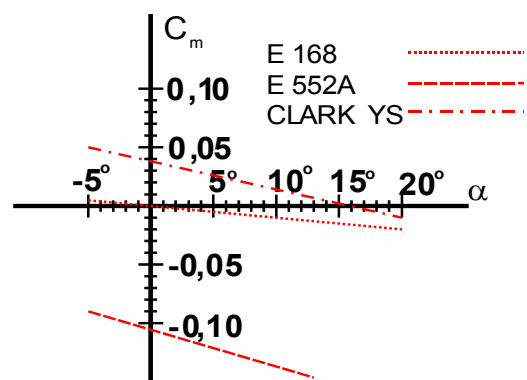
h : a szelvény húrhossza.

A nyomatéki tényező lehet negatív és pozitív egyaránt. A negatív nyomatéki tényező a szárny belépőélét lefelé, míg a pozitív felfelé igyekszik fordítani.

Minél nagyobb a nyomásközéppont vándorlásának mértéke, annál jobban kihat a repülőgép stabilitására. Sajnos, az állásszög növelésével a nyomásközéppont változó mértékben mindig előre vándorol, ami instabilitást eredményez. Általánosságban elmondható, hogy az erősen ívelt szelvényeken a nyomásközéppont vándorlás jelentős mértékű, míg a szimmetrikus, illetve „S” profilokon kisebb mértékű. A 2.7. diagram⁵⁷ három különböző szárnyszelvény nyomatéki tényezőjének változását szemlélteti az állásszög függvényében. Az „E 168”, szimmetrikus profil pozitív állásszög esetén negatív nyomatékkal rendelkezik, ami az állásszög növelésével enyhén csökken (abszolút értékben növekszik). Az „E 552A”, ívelt szárnyszelvény nyomatéki tényezője erősen negatív és az állásszög változásával nagyobb mértékben változik, mint a szimmetrikus „E 168” szelvény esetében. A CLARK YS, ívelt „S” profil nyomatéki tényezője pozitív (15 fokos állásszöggig, ami gyakorlatilag a normál repülési tartomány felső határa).

A negatív nyomatéki együtthatójú szárny stabilitását a súlypont és a nyomásközéppont helyzete a 2.8. diagram⁵⁸ szerint határozza meg. Amennyiben a súlypont a nyomásközéppont előtt helyezkedik el, a szárny stabil, de ez gyakorlatilag a meredek zuhanásnak felel meg.

Ha a súlypont a nyomásközépponttal egybe esik, akkor a szárny indifferens, azaz a zavarásokra sem alakul ki visszatérítő nyomaték, ami repülési szempontból nem megfelelő.



2.7. diagram: A szárnyszelvény nyomatéki tényezőjének változása az állásszög függvényében⁵⁷ [5]

⁵⁷ A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András.

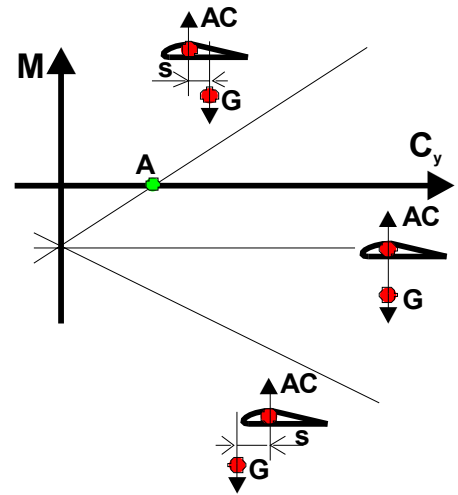
⁵⁸ A diagramot Jereb Gábor, *Vitorlázó repülőgépek*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977 nyomán készítette Molnár András.

Ha a súlypont a nyomásközéppont mögött helyezkedik el, egyetlen állásszög esetében (a felhajtóerő tényező (C_y) és az állásszög között kölcsönösen egyértelmű összefüggés alapján) kialakul ugyan stabil állapot (A), de ez nem elegendő a stabil repüléshez. Mindezek alapján belátható, hogy a hagyományos szárnyak önmagukban nem képesek stabil repülésre. A hosszstabilitást a hagyományos repülőgépek esetében a farok részen (különleges, úgynevezett „kacs” repülőgépeknél az orr-részen) elhelyezett vízszintes stabilizáló felületek biztosítják.

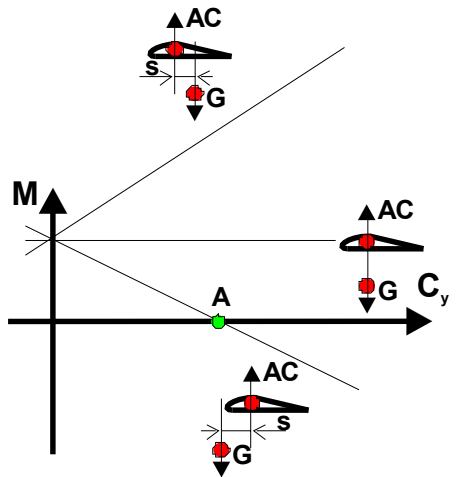
Mivel az „S” profilok nyomatéki együtthatója pozitív, lehetőség van az önmagában is stabil szárny megkonstruálására. A csupaszárnyak egyik lehetséges megoldása, ha a szárny „S” profillal készül. Ebben az esetben a stabilitás kialakulása a 2.9. diagram⁵⁹ alapján értelmezhető. Amennyiben az „S” profilú csupaszárny súlypontja a szelvény nyomásközéppontja előtt helyezkedik el, a keletkező nyomoték a zavaró hatásokra megfelelő értelmű, azaz a szárnyat az eredeti állapot felé mozgatni igyekszik (negatív meredekségű függvény).

A fentiek értelmében egy érdekes gyakorlati következtetés vonható le! A hagyományos repülőgépek esetében a súlypont valahol a szárny húrhosszának első negyede (25%-a) mögött található, míg a csupaszárnyak esetében a súlypont a szárny húrhosszának első negyede előtt található!

A súlypont lehetséges helyzetére vonatkozó megállapítás nem érvényes olyan konstrukciókra, ahol a stabilizátorok – jelen esetben a vízszintes vezérsíkok – hordfelületként is viselkednek. Ilyenek lehetnek a „kacs” elrendezésű repülőgépek, ahol a nyomásközéppont akár a szárny fizikai felületén kívülre is eshet, vagy az olyan hagyományos konstrukciójú repülőgépek, ahol a farokfelület állásszöge nem nulla, illetve azon vízszintes, zavarásmentes repülés alatt felhajtóerő keletkezik!



2.8. diagram: A nyomásközéppont és a súlypont hatása a stabilitásra negatív nyomotékú szelvény esetén⁵⁹ [5]



2.9. diagram: A nyomásközéppont és a súlypont hatása a stabilitásra pozitív nyomotékú szelvény esetén⁵⁹ [5]

⁵⁹ A diagramot Jereb Gábor, *Vitorlázó repülőgépek*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977 nyomán készítette Molnár András.

2.2.5. Lengések kialakulása

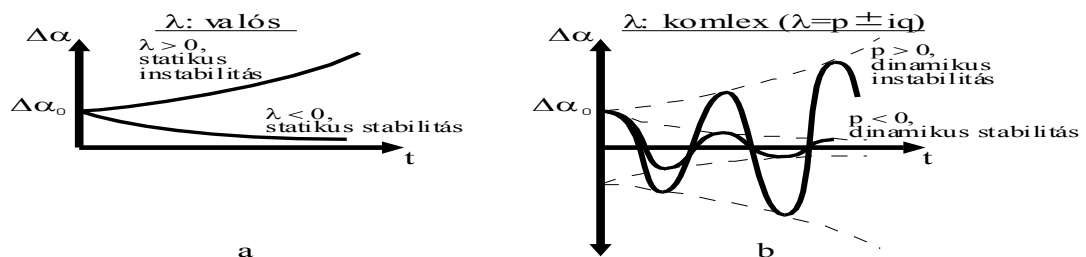
Az eddigi vizsgálatok csupán arra szorítkoztak, hogy meghatározzák a zavaró hatások által kiváltott mozgások irányát, azaz kompenzálják, vagy erősítik annak hatását. A repülőgépek esetében igen fontos a kompenzációs hatás időbeli lefolyásának vizsgálata. Előfordulhat, hogy a zavaró hatásra a repülőgép kedvező irányú mozgással reagál, de mégsem stabil a rendszer. A zavarás hatására a repülőgép periodikus lengésbe kezdhet. A lengések jellege lehet csillapodó, erősödő, esetleg állandó amplitúdójú. Stabillnak akkor mondjuk a rendszert, ha a zavaró hatásra legfeljebb csillapodó lengés keletkezik. Az állandó amplitúdójú, vagy erősödő lengések esetében a repülőgép instabil, repülésre alkalmatlan.

A lengéseket és azok jellegét a repülőgép általános mozgásegyenleteinek meghatározásával, illetve azok megoldásaival lehet meghatározni, és előre tervezni. Az egyenleteket átírva homogén lineáris egyenletekké, megadhatók azok negyedfokú karakterisztikus egyenletei. A karakterisztikus egyenletek gyökeinek (λ) jellegéből lehet következtetni a stabilitás jellegére (2.10. diagram) [24].

Amennyiben a gyök valós, a mozgás jellege aperiodikus (2.10. diagram „a” grafikon). Pozitív gyök esetében statikus instabilitást, negatív gyök statikus stabilitást jelent.

Komplex gyök esetén a mozgás jellege periodikus (2.10 diagram „b” grafikon). Pozitív valós tag esetén a lengés növekvő amplitúdójú, azaz dinamikus instabilitásra, míg negatív valós tag esetén a lengés csökkenő amplitúdójú, azaz dinamikus stabilitásra utal.

A 2.10. diagram alapján látható, hogy a statikus stabilitás feltétele a dinamikus stabilitásnak.



2.10. diagram: A karakterisztikus egyenlet gyökeinek befolyása a statikus (a) és a dinamikus (b) stabilitásra [24]

Az ismertett elméleti megközelítések további finomítása szükséges. A gyakorlatban megvalósuló repülőgépek jellemzői kis mértékben eltérhetnek az elvárttól. Az egyes paraméterek végleges meghatározása kísérleti repülések során lehetséges.

2.3. Kísérleti robotrepülőgép fejlesztésének „gyors prototípus” módszere

Kutatásaim alátámasztása, valamint további tapasztalatszerzés érdekében több kísérleti repülőeszközt készítettem. A kísérletek célkitűzései az alábbi csoportokba sorolhatók:

- Alacsony költségű, „gyors prototípus” építési technológia kidolgozása.
- Elektromos hajtás optimalizálása, felhasználási lehetőségeinek kiszélesítése.
- Fedélzeti, valós idejű mozgóképrögzítés és továbbítás adaptációja robotrepülőgépekre.
- Távírányítás a fedélzeti kamera segítségével.
- Robotrendszer tervezése, tesztelésére, berepülésére alkalmas aerodinamikai konstrukció megvalósítása.

Mivel a fent felsorolt kutatási célok és szempontok a robotrepülés viszonylag széles skáláját ölelik át, több, esetenként csupán egyes részelemek igazolását, illetve vizsgálatát lehetővé tevő eszközt készítettem.

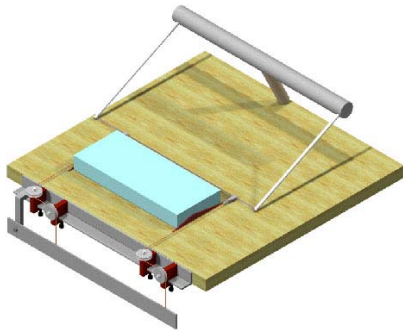
2.3.1. Habanyagok alkalmazása a robotrepülőgépek sárkányszerkezetének kialakítására

A habanyagok vizsgálatának célja, egy olyan építési technológia kikísérletezése volt, amely költség-hatékony, gyors és kellően rugalmas. A kész szerkezeten esetlegesen szükséges változtatások gyorsan és egyszerűen végrehajthatók. Ezeket az igényeket a különböző sztirol habok, mint építési alapanyagok, biztosítják. A kereskedelemben alapvetően két eltérő technológiával gyártott hab kapható.

A „Hungarocell” vagy „Nikecell” néven forgalomba hozott habok apró göböcskékből állnak. Ez az anyag különböző tömörségű minőségben kerül forgalomba. Előnye, hogy olcsó, könnyen beszerezhető és viszonylag könnyű. Hátránya, hogy a hab cellái nem zártak, ezért nem vízálló, a ragasztót erősen felszívja, és a habot alkotó göbök hajlamosak a kimorzsolódásra.

A „Roofmate” vagy „Styrofoam” márkaneven forgalomba hozott habok zártcellás, homogén szerkezetűek. Ennek köszönhetően teljesen vízállóak és a ragasztóanyagot sem szívják fel. Lényegesen kedvezőbb mechanikai tulajdonsággal rendelkeznek a „Nikecell” haboknál, ugyanakkor nehezebbek annál.

Mindkét hab alkalmas kísérleti célú repülőgépek építésére. Az alkalmazott vágási technológia is megegyezik. A habot igen könnyen lehet vágni elektromos árammal felmelegített huzal segítségével (2.3. kép⁶⁰).



2.3. kép: Elektromos árammal fűtött huzallal üzemelő habvágógép⁶⁰

Az egy tömbből kivágott szárnyak vágási egyenetlenségeit finom szemcséjű csiszolópapírral lehet kijavítani. A szárnyakba hosszirányban vékony fenyőlécet kell elhelyezni a megfelelő mechanikai szilárdság érdekében. A hab jól ragasztható „Epoxi” alapú műgyantával. A sztirol alapú gyanták nem alkalmasak, mert erősen oldják a habot. Az erős kopásnak vagy sérüléseknek kitett részeket (törzs alja, szárnyak belépő és kilépő élei) célszerű vékony, sűrű szövésű üvegszövet és műgyanta segítségével erősíteni.

2.3.2. Elektromos hajtás

A kis és közepes hatósugarú robotrepülőgépek esetében az elektromos hajtás előnyei jól kihasználhatók. A modern, magas hatásfokkal üzemelő elektromotorok megfelelő hajtást biztosítanak minden olyan esetben, amikor a repülési idő nem haladja meg az 1-2 órát, és az üzemeltetési igények közt kiemelt szempontot képez a minimális zajkibocsátás, valamint a „tiszta”⁶¹ üzem.

Az elektromos hajtás lehetőségét a repülőeszköz felszállásához és levegőben tartásához szükséges teljesítményigény, az elektromotor teljesítménye, valamint az akkumulátorok kapacitása és terhelhetősége határozza meg.

A legkorszerűbb elektromos hajtásláncot a háromfázisú motorok és a hozzájuk kapcsolt Lithium-Polymer akkumulátorok biztosítják.

2.3.3. Kombinált hajtás a repülés biztonságának növelése érdekében⁶²

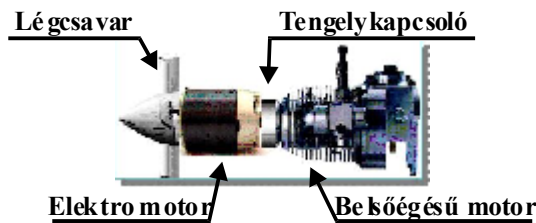
A belsőégésű motorokkal üzemelő robotrepülőgépek üzembiztonsága nagymértékben függ az alkalmazott motor üzembiztonságától. A repülés során bekövetkezett motorleállás kényszerleszállást eredményez. A belsőégésű motorok levegőben történő indítása céljából fedélzeti indítómotort kell alkalmazni, ami a repülés további szakaszában (gyakorlatilag a repülés teljes időtartama alatt) felesleges teher.

⁶⁰ Forrás: <http://www.sea-gull.demon.co.uk/> (2004. december).

⁶¹ Tiszta üzem alatt azt kell érteni, hogy a repülés során nincs égéstermék-emisszió.

⁶² Eredményeim az [NC2, NC3]-ban publikáltam.

Amennyiben az **indítómotor helyett egy**, az elektromos hajtású repülőgépeknél alkalmazott, nagy teljesítményű és jó hatásfokú **elektromotort kapcsolunk a belsőégésű motor és a légycsavar közé**, akkor egy új, nagyobb biztonságú és jobb teljesítményű hajtáslánchoz jutunk (2.4. kép⁶³).



2.4. kép: Kombinált hajtáslánc⁶³

Az általam javasolt módon kialakított, kombinált hajtású robotrepülőgép normál működés során az elektromotort, mint fedélzeti generátort hasznosítja. Az innen nyert elektromos energia képes ellátni a fedélzeten lévő összes elektromos rendszert.

A belsőégésű motor meghibásodása esetén a tengelykapcsoló automatikusan leválasztja a légycsavar és az elektromotor közös tengelyét. Ezt követően a bekapcsolódó elektromos hajtás, ami lehetőséget biztosít a robotrepülő számára a repülési tervben előre meghatározott biztonsági zónák közül a legközelebbi elérésére.

2.3.4. Kis hatótávolságú, elektromos felderítő repülő (MANDI-4⁶⁴)



2.5. kép: A MANDI repülőgép⁶⁴

A MANDI geometriáját két szempont határozta meg. Alapvető cél volt a gép könnyű vezethetősége, és a kézből eldobható startolási képessége. Mindezeket döntően a szárny profilja határozza meg. A profil kiválasztását egy adatbázis segítségével végeztem [I.6.], ahol a gép tömege és tervezett sebessége ismeretében lehet az adott profilok különböző adatait tanulmányozni. A céljaimnak legalkalmasabb profil a „Clak-Y” volt.

Bár a karcsú (rövid húr hossz és nagy fesztáv) szárnyak aerodinamikai tulajdonságai kedvezőbbek, azok precíz súlypontbeállítást igényelnek. A MANDI húr hossza a szárnytőben 300 mm, szárnyvégeken 200 mm 1440 mm fesztáv mellett. Ez a kialakítás lehetővé tette, hogy a gép tényleges súlypontja az elméleti súlyponthoz képest ± 30 mm-t eltérhessen különösebb stabilitási problémák megjelenése nélkül. A második szempont volt, hogy a gép alkalmas legyen fedélzeti kamera hordozására. Erre a legkedvezőbb

⁶³ A rendszert tervezte Molnár András.

⁶⁴ A repülőgépet készítette Molnár András.

helynek a gép orra bizonyult úgy, hogy a kamerát 30 fokos szögben lefelé megdöntöttem. A kamera szabad kilátása érdekében a légcsavart nem akartam a látótérbe helyezni. Kedvező megoldásnak kínálkozott két húzómotor felszerelése a szárnyakra a törzstől 200-200 mm-re.

A gép kormányzása csűrő, magassági és motorszabályozással lehetséges. Az egyszerűség érdekében a függőleges vezérsíkok rögzítettek, kormányzásuk nem lehetséges. A nagyobb stabilitás érdekében a gép két függőleges vezérsíkkal, valamint 3 fokos „V” szárnytöréssel rendelkezik. Az alkalmazott villanymotorok Graupner Speed-400 típusúak. Az energiaellátást 2400 mA/óra kapacitású, 8 cellás (9,6V) akkumulátor biztosítja. A videokamera és a 100 mW-os, 2,4 GHz-es adó táplálását a motor és vezérlőrendszer akkumulátorától külön, két párhuzamosan kapcsolt, 9 V-os elem biztosítja.

A gép első repülési próbái kedvezően alakultak. A „jóindulatú” gép üzemeltetéséhez elegendő egy ember. Ez igaz a kézi startra is. A kézből eldobott repülő annyira stabil, hogy utána elegendő idő marad a távirányító kézbevételére és az irányítás megkezdésére. A repülő néhány jellemzőjét a 2.1. táblázat tartalmazza. A gép repülési stabilitására jellemző, hogy szeles, esős időben is könnyen vezethető maradt. A nagyfokú stabilitás ellenére, köszönhetően a csűrőkormányzásos vezetésnek, a gép fordulékony⁶⁵.

Motor típusa	Hajtómű	Légcsavar	Áramfelvétel	Repülési idő	Emelkedési szög
2xGraupner 400	direkt	6"x4"	22 A	10 perc	3-8 fok
2xGraupner 400	direkt	6"x3"	19 A	12 perc	3-8 fok
2xGraupner 400	3,5:1	9,5"x5"	17 A	12 perc	5-15 fok

2.1. táblázat: A „MAND” repülőgépek hajtásláncainak hatása

Az első kamerás kísérletek során a kamera és a video adó táplálását a repülőgép akkumulátoráról oldottam meg. Ez a megvalósítás teljesen alkalmatlannak bizonyult a motorok bekapcsolását követően. A magas áramfelvétel miatt az akkumulátorok kapocsfeszültsége 8,5 V alá esett, ami a video rendszer működésének alsó határa volt. Ezt követően került beépítésre két párhuzamosan kapcsolt 9 V-os elem, ami a repülő akkumulátorától teljesen független áramellátást biztosított. A módosítást követő, videokamerával történt repülések során megállapítottam, hogy a kamera beállítása minimális korrekcióra szorul. A legjobban értékelhető képet akkor kaptam, amikor vízszintes repülésnél a horizont a monitor közepén volt látható. Sajnos az alkalmazott CCD kamera fényérzékenysége a beépített „autoírisz” ellenére is túl nagyknak bizonyult.

⁶⁵ Eredményeimet az [NC4]-ben publikáltam.

Napsütéses napokon a felvételek túl világosak lettek. Kedvező képminőséget napnyugtakor, illetve erősen borult időben sikerült elérnem. A videofelvételek



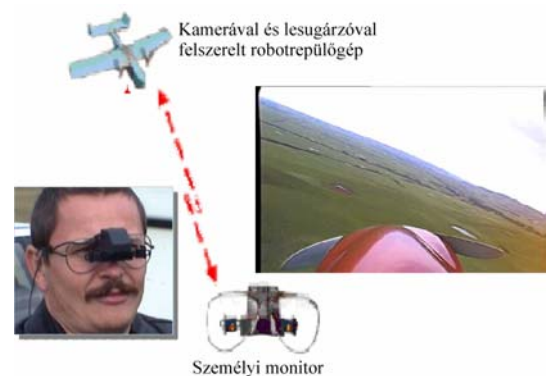
2.6. kép: A MAND1 géppel készült videofelvétel részlete⁶⁶

készítésének erős korlátja a 100 mW teljesítményű adó volt. Ezzel a teljesítménnyel gyakorlatilag 300-400 m sugarú körben lehetett képet kapni (2.6. kép⁶⁶). A repülések során gyakran jelentkezett képátviteli hiba. Ezek a képkimaradások döntően fordulókban repüléskor következtek be.

Kísérletet tettem a repülő vezetésére az általa hordozott kamera képe alapján.

Ennek érdekében egy speciális szemüveget használtam (2.7. kép), mely a képet közvetlenül a szemem elé vetítette, de nem takarta el a teljes kilátást, így megmaradt a hagyományos vezetés lehetősége is. A módszer előnye, hogy ha elvesztem a gép feletti uralmat, felnézve a repülőre, hagyományos vezetési technikával megmenthető. A látott kép alapján a repülőgép vezetése alapvetően nem okozott problémát, ugyanakkor a tájékozódást igen hamar elveszítettem. Ennek oka az volt, hogy a kamera merev beépítésének köszönhetően nem nyílt lehetőség jobbra-balra történő kitekintésre. A korlátozott látómezőt sikerrel kompenzáltam az „élő” képre felkevert navigációs adatokkal, melyeket a fedélzeti GPS készülék szolgáltatott. Az így kialakított kép segítségével a tájékozódás a repülés tetszőleges pillanatában megfelelő volt. A rendszer további előnye, hogy a magasság, a kamera látószöge, optikai tengelye, valamint az aktuális GPS koordináták alapján a repülés során látott objektumok térképeken is jól meghatározhatók.

A több órás kísérleti repülések során több videofelvételt rögzítettem. Ezeket a légi felvételeket több szakember is hasznosíthatónak, illetve továbbfejlesztésre alkalmasnak ítélte⁶⁷. A személyes tapasztalataim és a potenciális felhasználói visszajelzések alapján a kísérletek folytatása,



2.7. kép: Személyi monitorral ellátott robotrepülőgép-rendszer

⁶⁶ A felvételt készítette Molnár András.

⁶⁷ Eredményeimet az [IC2, IC6]-ban publikáltam.

illette a robotrepülőgép továbbfejlesztése mellett döntöttem.

A MAND2 kísérleti repülőgép fizikai felépítésében teljesen megegyezett a MAND1-ével. Az eltérés kizárólag a hajtásláncba beiktatott lassító áttétel, valamint ennek következményeképp a légsavár mérete volt. A kísérlet során azt vizsgáltam, miként befolyásolja a repülési tulajdonságokat a lassító áttétellel ellátott elektromotor.

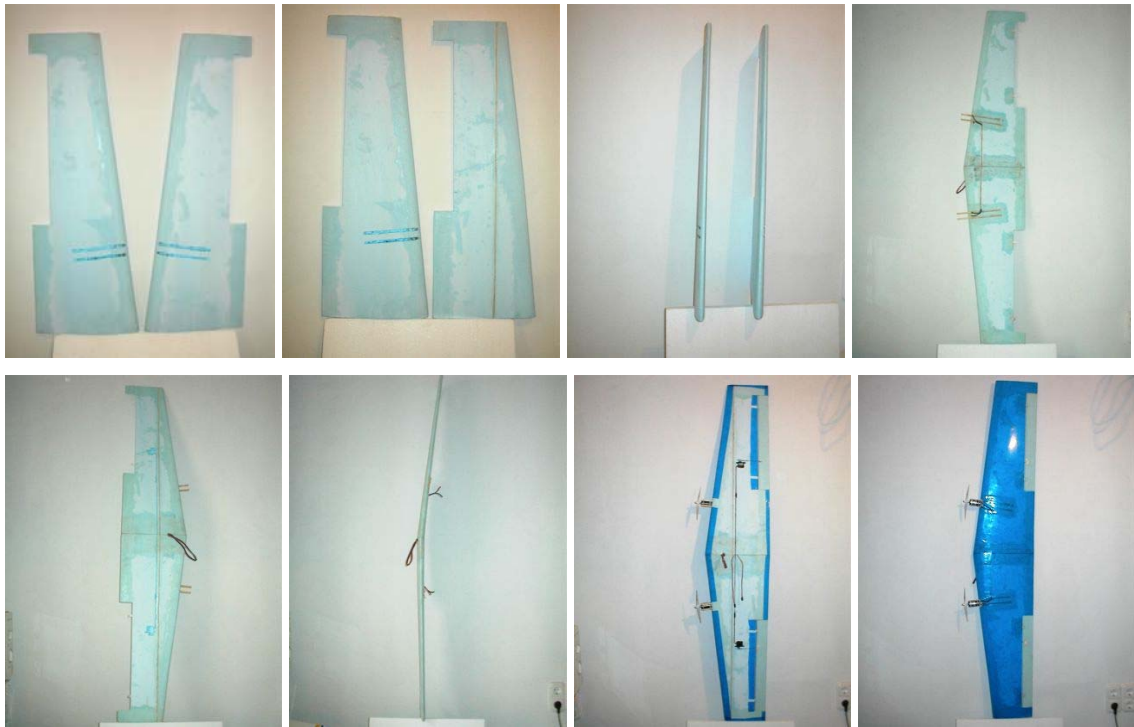
A MAND3 repülőgép (2.8. kép⁶⁸) során **pontosítottam és dokumentáltam⁶⁹ azt a**



2.8. kép: A MAND3 repülőgép⁶⁸

technológiát, amivel a MAND repülőgépek készültek. A gépek alapanyagául választott habosított polisztiroltáblából **sablon segítségével, elektromos árammal fűtött huzallal vágtam ki a főbb darabokat** (szárnyak, vezérsíkok, törzset alkotó elemek). A kivágást követően a **felület csiszolása**, az esetleges **igazítások, bemarások** kialakítása

történt, majd az **egyes elemek összeragasztása** következett. A 2.9. képsorozat a fent leírt folyamat egyes fázisait szemlélteti. A szárny elkészítése közel 4 óra. Ez az építési idő igen rövidnek mondható!



2.9. kép: A MAND3 szárnyának építési fázisai⁶⁹

⁶⁸ A repülőgépet készítette Molnár András.

⁶⁹ Eredményeim az [NC2]-ben publikáltam.

A MAND3 szárnya⁷⁰, az előző változatoktól eltérően, úgynevezett lamináris profillal készült. A profilválasztástól a repülési sebesség növekedését vártam. Mivel a nagyobb sebesség négyzetesen növekvő ellenállást jelent, a szárny vékony fóliabevonatot kapott, ami a felületi simaságot növelte.

A MAND3 a tervezési elvárásoknak megfelelően repült, de a megnövekedett repülési sebesség a fedélzeten alkalmazott képfelvevő rendszer szempontjából nem bizonyult kedvezőnek. A valós idejű videokon a kép túl gyorsan változott, így nem maradt elég idő a látott információ megértésére. Nagyobb magasságú repülések során – ahol a kép változásának sebessége már megfelelő lett volna – a felbontás alacsony szintje miatt nem lehetett megfelelő információhoz jutni.



2.10. kép: A MAND4 repülőgép⁷¹

A kétmotoros meghajtás további tanulmányozása érdekében készítettem a MAND4 repülőgépet (2.10. kép⁷¹). Ez a modell két darab háromfázisú motorral lett megépítve úgy, hogy a motorokat egymástól függetlenül is lehetett szabályozni. Az 1,7 méter szárnyfesztávú, 2,5 kg tömegű gép kézi indítása segített igényelt. A startot követően a két motor igen dinamikus emelkedést biztosított a gépnek. Sajnos, a nagy teljesítmény nagy fogyasztással párosult, ami az első kísérletek idején 3 perces repülési időt tett lehetővé! Később a repülési időt 9 percre sikerült kibővíteni úgy, hogy csökkentettem az alkalmazott légcsavarok méretét, valamint a startot követően 75%-ra korlátoztam a maximális teljesítményt.

A 2.2. táblázat⁷² összesítve mutatja a MAND1-4 repülőgépek főbb paramétereit. A kísérletek során több repült óra tapasztalatot szereztem. A repülések jelentős részéről videofelvételek készültek, melyek segítségével utólagosan is elemezhetők az egyes repülések. Sikeres fedélzeti videók sokasága támasztotta alá az olcsó és könnyen kivitelezhető légi felvételek készítésének lehetőségét és használhatóságát.

Fesztávolság	1,4-1,7 m
Hossz	1,3 m
Felszálló tömeg (hasznos teherrel)	1,6-2,5 kg
Hatósugár	3-5 km
Repülési idő	9-15 perc
Fedélzeti navigáció	PCM rádió távirányítás
Hasznos teher	Kamera, video adó.

2.2. táblázat: A „MAND” repülőgépek főbb paramétereit⁷²

⁷⁰ A szárnyakat építette Molnár András.

⁷¹ A repülőgépet készítette Molnár András.

⁷² A táblázat adatai a szerző által készített kísérleti sorozatú gépek (MAND) főbb technikai paramétereit tartalmazza.

2.3.5. Kis hatótávolságú, elektromos felderítő repülő (REKA1)



2.11. kép: A REKA1 repülő kamera⁷³

A REKA1 kísérleti repülőgép célja egy nagyon kistömegű (300-400 gramm), távirányítható repülő kamera megvalósítása volt. A csupaszárny konstrukció a legmodernebb építési technikákkal és anyagokkal valósult meg. A teherviselő elemek szénszálalás, műgyanta erősítésű csövekből, a hordfelületek (szárnyak) és stabilizátorok pedig, zártcellás, extrudált polisztirol habból készültek. A repülőgép

energiaellátását 8 darab, sorba kapcsolt „AAA” jelzésű, 750 mA kapacitású, NiMh akkumulátor biztosítja. A 400 gramm össztömegű eszköz repülési ideje, a szükséges manőverektől, valamint az időjárástól függően 10-15 perc. A fedélzeti kamerát és a video adót egy független, 8,4 V-os NiMh, vagy egy 9 V-os alkáli elem táplálja.

A repülőgép tervezése során kiemelt szempont volt a gyors és olcsó megvalósíthatóság, valamint az egyszerű kezelhetőség. A REKA1⁷³ kézből indítható, nem igényel repülőteret, repülése rendkívül stabil. Az irányítás úgynevezett elevonokkal (kombinált, csűrő-magassági kormányfelületek) valósult meg. Ez a megoldás némileg eltér a hagyományos repülőgépektől, de csupaszárnyak, illetve deltaszárnyak esetében elterjedt. A prototípus elkészítése kb. 8 óra, ami sorozatgyártás esetében jelentősen csökkenthető. Ez a rendkívül rövid építési idő alkalmassá teszi a repülőeszközt olyan feladatok ellátására, ahol a feladat befejeztével maga az eszköz megsemmisül, vagy visszatérésének valószínűsége alacsony.

A kis tömegnek köszönhetően a repülőeszköz különleges feladatok ellátására is alkalmas. Mivel az alig 400 grammos repülőeszközhöz fajlagosan nagy felületű szárnyak tartoznak, még függőleges zuhanás során sem gyorsul fel jelentősen, így a becsapódási impulzus, kedvezően alacsony értékű marad. A fenti állítást kísérletekkel igazoltam. A repülőgépet teljes felszereléssel (kamera, akkumulátor) 30 méteres magasságban függőleges zuhanásba vittem. A zuhanás mindaddig tartott, míg a repülőgép földnek nem csapódott. Mivel az első zuhanás után a gép tökéletesen repülőképes maradt, a zuhanást további két alkalommal megismételtem (közvetlenül egymást követő három becsapódás 30

⁷³ A repülőgépet készítette Molnár András.

méter magasról). A REKA1 a harmadik becsapódást követően elvesztette a jobb oldali stabilizátort, így átmenetileg repülésképtelenné vált. Ezt a hibát a helyszínen 10 perc alatt ki lehetett javítani! A fentiek alapján a modell becsapódási impulzusa annyira alacsony (3 mm vastag extrudált polisztirol habszárnyak nem törtek és nem repedtek el), hogy egy esetleges emberrel történő ütközés nagy valószínűséggel nem okozna maradandó személyi sérülést. A fentiek értelmében a REKA1 alkalmas lehet zsúfolt terek feletti repülésre anélkül, hogy reális veszélyt jelentene az alatta tartózkodó személyekre.

A repülőgéppel több kísérletet végeztem. A kísérletek első részében a repülési tulajdonságok vizsgálata volt a feladat. A REKA1 rendkívül könnyen vezethetőnek bizonyult. A motor teljesítménye még egyszerűbb műrepülő figurákat is (bukfenc, orsó) lehetővé tett. Repülés során vizsgáltam a szerkezet mechanikai szilárdságát is. A repülőgéppel nem lehetett olyan manővert végrehajtani, ami a levegőben maradandó alakváltozással járt volna. A fentiek alapján a berepült repülőgépet vezetési hibából adódóan a levegőben nem lehet összetörni!

A további kísérletek a felderítési feladatok vizsgálatát célozták. Számos repülés során készítettem felvételeket⁷⁴ a repülőgép kamerájával. A kísérletek során vizsgáltam a



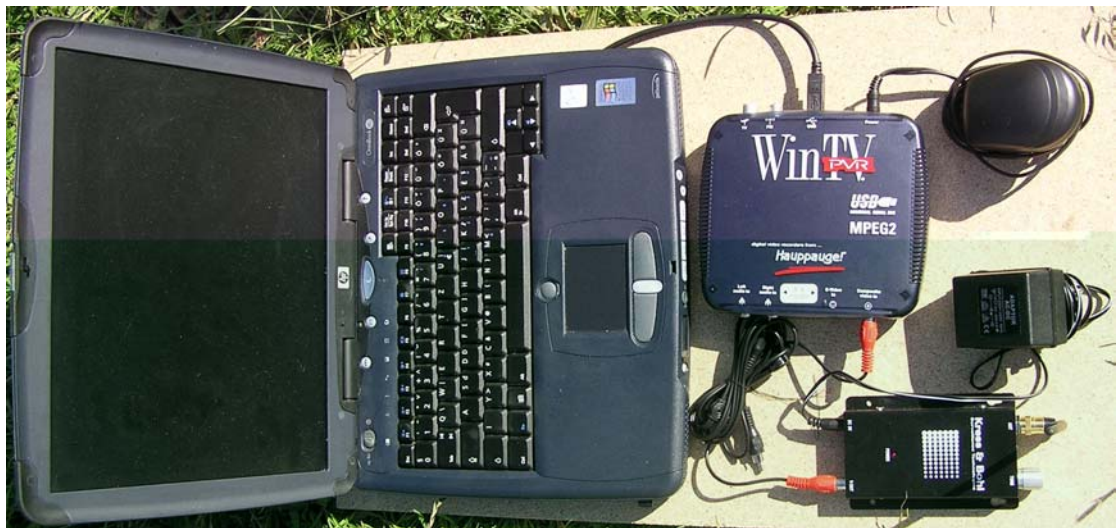
2.12. képek: Egy kísérleti repülés során rögzített felvétel képkockái (REKA1)⁷⁴

⁷⁴ A felvételeket készítette Molnár András.

repülés sebességének, magasságának, valamint a manőverek gyakoriságának hatását a felvételekre. Megállapítottam, hogy alacsony repülések során (10-15 méter) a felvételen a kép gyorsan változik, így annak valósidejű kiértékelése nehézségekbe ütközik. A felvételek minősége és a változás sebessége 20-30 méter magasságból megfelelő volt, míg nagyobb magasságból már a kamera felbontása nem volt elegendő a kellően részletes képek készítéséhez. Információgyűjtés tekintetében kedvezőtlennek bizonyultak az intenzív és gyakori irányváltásokkal járó manőverek. Legjobb eredményt akkor kaptam, amikor a repülési magasság a célterület felett 20-30 méter volt, a repülési útvonalat pedig, előre megtervezve, ”lapos”, nagy ívű fordulókkal valósítottam meg.

A 2.12. képen látható felvételsorozat egy kísérleti repülés során rögzített video kiemelt kockái.

A felvétel minőségét nagymértékben korlátozta a fedélzeten elhelyezett olcsó CMOS kamera. Az alkalmazott kamera egy vele egybeépített 250 mW-os adómodullal rendelkezett, mely segítségével közel 300 méter sugarú körben a vétel minősége megfelelő volt. A földi egység egy hordozható számítógépből, egy vevőből, valamint egy digitalizáló egységből állt (2.13. kép⁷⁵). A repülés során a földi állomáson a repülőgép által rögzített video valósidőben nézhető volt.



2.13. kép: A földi „jelfeldolgozó” egység⁷⁵

⁷⁵ A képen látható rendszer segítségével kb. 1 óra folyamatos videofelvétel rögzíthető. A képet készítette Molnár András.

2.3.6. Közepes hatótávolságú, robbanómotoros robotrepülő (Warrior)⁷⁶



2.14. kép: Warrior robotrepülő⁷⁶

robotrepülőgép alkalmazásával.

A Warrior kísérleti robotrepülőgép célja egy olyan repülőkonstrukció megalkotása, amely alkalmas a robotpilóta működésének bemutatására, valamint annak fejlesztésére. A repülőgép további célja, hogy demonstrálni lehessen kisebb berendezések (pl.: rádiózavaró berendezés, telemetriai szenzor stb.) célba juttatásának lehetőségét

A repülőgép tervezése során alapvetően két szempont dominált.

- A gép fizikai méretei tegyék lehetővé a robotpilóta egység és egy kisméretű kamera, valamint a hozzá tartozó lesugárzó egység elhelyezését.
- A gép legyen könnyen kezelhető, ne igényeljen különleges képességű kezelőszemélyzetet.

Az első kritérium teljesítése viszonylag egyszerű, hiszen minden beépítendő eszköz (elektronika, kamera, lesugárzó) rendelkezésemre állt, így azok fizikai méretei voltak az irányadóak. A géptörzs a robotrendszer miatt az adott méretű repülőgépekhez képest valamivel nagyobb (vastagabb) lett, de ez számottevően nem befolyásolta a gép repülési tulajdonságait.

A második kritérium teljesítése összetett ismereteket igényel. Az aerodinamikai tervezésnél felhasználtam a „Robotrepülőgépek aerodinamikája” fejezetben leírtakat. A szárny profiljának kiválasztásakor szélcsatorna szimulátor programot alkalmaztam [5]. A szárny erős „V” törésű és 4 fokos negatív elcsavarással rendelkezik. A szárnyon légtérelő lemezeket helyeztem el, melyek feladata, hogy a felületen keletkező turbulens leválást ne engedjék a szárnyvégek irányába tovább terjedni. A szárnyvégeket kisméretű, a szárnyra

⁷⁶ A repülőgépet készítette Molnár András.

merőleges síklapokkal zártam le, melyek célja a szárnyvégeken keletkező, nyomáskiegyenlítésből adódó örvényképződés csökkentése.

A Warrior sebességének növelése érdekében futóművei behúzhatóak. A behúzott futóművek a repülőgép légellenállását csökkentik. A kisebb légellenállás nagyobb végsebesség elérését teszi lehetővé, ami közvetve nagyobb hatótávolságot biztosít.

Mivel a repülőgép hajtóművet az orr-részbe építettem be, a fedélzeti kamera a bal szárny alsó felén kapott helyet úgy, hogy a kamera látómezejének jelentős része a légcsavarkörön kívül esik. A kamera képét egy 1,5 W-os, 1,2GHz-es lesugárzó juttatja el a földi állomáshoz.



2.15. kép: Kilőhető rakéta a Warrior szárnyán⁷⁷

földi állomáshoz.

A Warrior szárnyán két kilövő pilont alakítottam ki, amik segítségével kisméretű rakéták indíthatók (2.15. kép⁷⁷). Ennek célja, hogy demonstrálja kisméretű eszközök (zavaró adó, telemetriai szenzor stb.) célba juttatásának lehetőségét robotrepülőgép segítségével. A pilonokat úgy helyeztem el, hogy a róluk indított rakéta

biztonságos távolságban haladjon el a légcsavarkör mellett.

Következtetések

A robotrepülőgépek aerodinamikai vizsgálata során az alábbi megállapításokat tettem:

- **A hazai, alacsony költséggel és egyszerűen üzemeltethető robotrepülőgép gondos aerodinamikai tervezéssel megvalósítható.** Az elvárásoknak megfelelő repülőkonstrukciónak az alábbi fő paraméterekkel kell rendelkeznie:
 - **Felsőszárnyas konstrukció.** Ez a megoldás biztosítja legjobban azokat a stabilitási jellemzőket, melyek könnyen vezethető robotrepülőgépet eredményeznek.

⁷⁷ A szárny alól kilőhető rakétákat demonstrációs jelleggel készítette Molnár András.

- **Enyhe, pozitív⁷⁸ „V” törésű szárny alkalmazása.** A pozitív „V” törésű szárny, kedvezően befolyásolja a robotrepülőgép repülési tulajdonságait.
- **A szárnyakon alkalmazott negatív elcsavarás.** A negatív elcsavarás elengedhetetlenül szükséges ahhoz, hogy a leszállások alkalmával az átesésből adódó balesetek (repülőgép sérülések) kockázatát a minimális szintre szorítsuk.
- A repülőszerkezetek kifejlesztése során feltétlenül alkalmazni kell olyan programokat, illetve berendezéseket, melyek képesek a tervezett repülőszerkezet várható viselkedését előre jelezni. Ilyen program lehet például az általam használt „Design foil”, szélcsatorna szimulátor.
- **Csupaszárny konstrukciók esetében kiemelt figyelmet kell fordítani a repülő szerkezet hossz-stabilitására.**

A kísérleti repülőgépek építése és tesztelése során az alábbi megállapításokat tettem:

- **A „gyors prototípus” építési technológia hatékony, költségkímélő** és a fejlesztések során kellően rugalmas, így tág teret biztosít a kísérletek során.
- **A kombinált hajtáslánc alkalmazása robotrepülőgépekben a repülés biztonsága szempontjából kulcsfontosságú.**
- **A fedélzeti kamera képe alapján vezetett robotrepülőgéppel nagy pontosságú felderítések végezhetők.**
- **A repülések során készített fedélzeti felvételek rámutattak arra, hogy lehetséges alacsony költségű, könnyen kezelhető, vizuális felderítésre alkalmas robotrepülőgépet építeni.**

A továbbiakban megvizsgálom, hogy a fedélzeti robotrendszerhez tervezett GPS⁷⁹ készülékek milyen pontossággal rendelkeznek, illetve milyen megbízhatósággal használhatók fel. Megvizsgálom továbbá, hogy más gyártók által készített fedélzeti robotrendszer miképp alkalmazható, illetve melyek az alkalmazásuknak az előnyei és a hátrányai.

⁷⁸ A pozitív „V” törés itt azt jelenti, hogy a szárnyak úgy vannak kialakítva, hogy a szárnyvég magasabban van, mint a szárnytő. Előfordul negatív „V” törésű szárny is. Ebben az esetben általában a túlzottan stabil repülőgépnek csökkentik a stabilitását, hogy a kormánymozdulatokra jobban reagáljon.

⁷⁹ GPS (Global Positioning System), azaz Globális Helymeghatározó Rendszer, vagy más néven Műholdas Helymeghatározó Rendszer.

III. Navigációs és repülés-stabilizációs rendszer

A modern technika fejlődésével a navigáció „hagyományos” formái kezdenek háttérbe szorulni, miközben a műholdak segítségével kiépített, és napjainkban is egyre bővülő szolgáltatásokkal ellátott GPS navigációs rendszer rohamosan terjed. Mivel az USA által üzemeltetett GPS rendszer alapvetően katonai célokkal valósult meg, feltételezhető, hogy a közeljövőben a rendszer üzemeltetése, illetve karbantartása gazdasági megfontolásoktól mentes – alapszolgáltatásai tekintetében –, így erre a rendszerre alapozva lehet további rendszereket fejleszteni. Mivel a GPS rendelkezik polgári hozzáféréssel, a robotpilóta rendszerem kifejlesztése és tesztelése során – a szükséges eszközök egyszerű hozzáférését szem előtt tartva – nem használtam katonai hozzáférésű készülékeket.

A repülés folyamata során szükség van az UAV pillanatnyi helyzetének pontos meghatározására. Ez az információ biztosítja a repülési terv pontos végrehajtását. A pontosság alapvetően két adattól függ:

- Az első a térinformatikai rendszerek adatbázisának (térkép és az ahhoz csatolt adatok) pontossága. Ezeknek az adatoknak a biztosítása időben megelőzi a repülést, azaz már a bevetést megelőzően rendelkezésre áll, és a bevetés időtartamára nézve statikusnak tekinthető.
- A második a fedélzeti helymeghatározó rendszer pontossága. Az UAV pillanatnyi pozíciójának pontossága a helymeghatározó rendszer pontosságától függ. Alapvetően koordináta párokról van szó, de gyakorlatilag ide sorolhatók a repülés során mérhető további jellemzők, mint például sebesség, magasság, irány stb. Ezek az adatok a repülés folyamán keletkeznek, és időben változnak, tehát dinamikusak.

3.1. A GPS rendszer jellemzői

A fedélzeti helymeghatározó rendszer több, egymás melletti, illetve hierarchikusan egymásra épülő egységből épülhet fel. A repülésben hagyományosan alkalmazott inerciális rendszerek alapelve az idő- és gyorsulásmérésen alapszik, így annak pontossága is e két érték pontosságán múlik. Az idő mérésének pontossága gyakorlati problémát nem okoz, ugyanakkor a gyorsulásmérések pontatlansága már okozhat jelentős hibákat. Az inerciális rendszerek alapvető problémája, hogy a hiba kumulatív, azaz az idő előre haladtával

összegződik. Noha, a modern inerciális rendszerek pontossága igen nagy, a repülés során többször (30-60 perc) is szükség van pontosításra, amit a földön telepített különféle rádió-navigációs jeladók segítségével lehet elvégezni. Ezek az adók típustól függően sugározni tudnak irányszöveget, távolságot és az adóra jellemző azonosító jeleket.

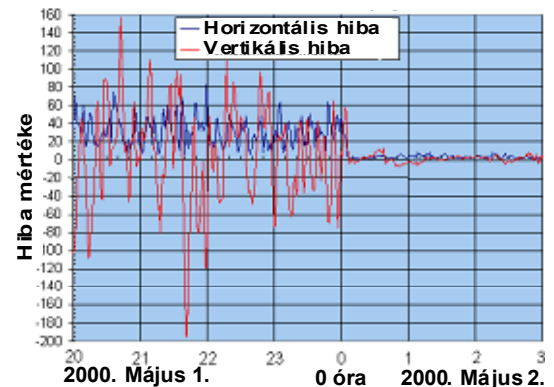
A helymeghatározás szempontjából új eszköznek mondható a GPS. Ennek alapját a Föld körül keringő műholdak, valamint azok jeleit fogadó és feldolgozó vevő egység képezi. A GPS nagy előnye, hogy a Föld gyakorlatilag bármely pontján alkalmazható, és a helymeghatározás pontosságát nem befolyásolja halmozódó hiba. A GPS az elmúlt években jelentős fejlődésen ment keresztül,

minek során a pontosság a kereskedelemben kapható készülékek esetében is 10 méter alá csökkent. Természetesen a pontosság javulását nagymértékben befolyásolta az a tény is, hogy az Amerikai Védelmi Hivatal 2000. május 2-án megszüntette a műholdak által sugárzott jel szándékos torzítását (3.1. diagram⁸⁰). Mivel az olcsó vevőkészülékek is képesek percenként legalább 3 mérést végezni a fenti precizitással, a GPS alkalmas lehet UAV-k fedélzeti helymeghatározó rendszerének megvalósítására.

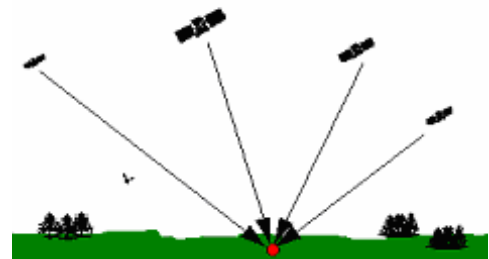
A GPS-ek pontosságát több tényező befolyásolja.

Ezek a következők:

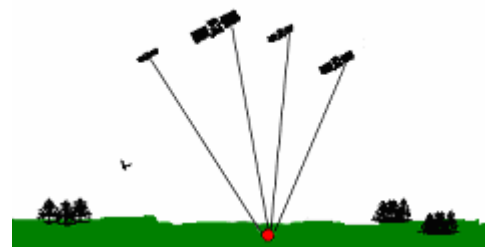
Műhold óra hiba	0,6 m.
Műhold konstellációs hiba	0,6 m.
Vevő hiba	1,2 m.
Atmoszféra/ionoszféra okozta terjedési hiba	4 m.
„SA” hiba	8 m.
GPS hiba (átlagos)	5,1 – 10,5⁸¹ m.



3.1. diagram: Az „SA” kód megszüntetésének hatása⁸⁰



3.1. ábra: Kedvező műhold konstelláció⁸⁰



3.2. ábra: Kedvezőtlen műhold konstelláció⁸⁰

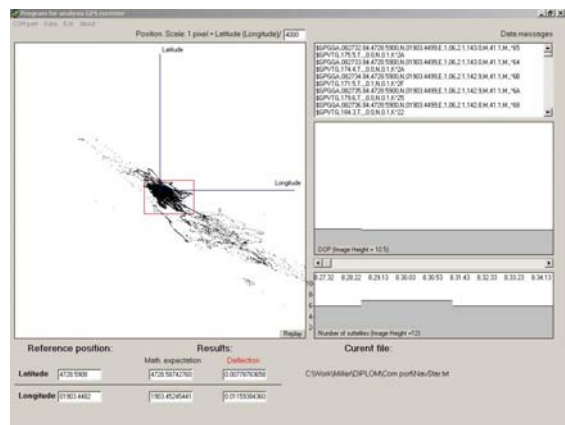
⁸⁰ Forrás: <http://www.cmtinc.com/gpsbook/index.htm#chap> (2005. január). Magyar feliratokat készítette Molnár András.

⁸¹ Az „SA” kód függvényében.

A fenti jellemzők egy része a mérést végző személyektől független, mint például a műhold saját órájának hibája, vagy az ionoszféra, illetve a légkör által okozott terjedési hiba. Más részük pedig, kisebb-nagyobb mértékben függő, mint például a vevő hibája (jobb-rosszabb vételi tulajdonságokkal rendelkező vevők alkalmazása) vagy a tereptárgyak okozta árnyékolás, illetve visszaverődések okozta hiba.

A GPS pontosságának meghatározása során különbséget kell tenni statikus és dinamikus pontosság között.

A statikus pontosság alatt értendő, hogy a készülék egy adott pontban mekkora pontossággal képes meghatározni helyzetét. Ez az érték függ a mérés helyétől (földrajzi koordináta), valamint a napszaktól, pontosabban az adott helyen és időben látható műholdak helyzetétől (3.1-3.2. ábrák) [1.5]. Bár statikus pontosságra vonatkozó mérési eredmények rendelkezésre állnak, adott GPS vevők esetében ezek az értékek mégis eltérőek lehetnek. Az általam használt készülékek statikus pontosságának a meghatározása érdekében különféle vevőkészülékekkel végeztem méréseket. A kísérletek 12 órás intervallumban mért adatait egy fixen elhelyezett vevő szolgáltatja. A kísérlet célja az volt, hogy meghatározzam a mérés bizonytalanságát. A feladat gyors és kényelmes végrehajtása érdekében készült a 3.3. ábrán⁸² látható program, mely képes tetszőleges GPS vevőegységek jeleit fogadni soros porton és az adatokat akár 24 órán keresztül gyűjteni. A kiértékelés elvégezhető a mérés folyamán (on-line), vagy utólagosan az adatállomány alapján. A képernyő bal oldalán látható „térkép” jeleníti meg minden egyes mérés pozícióját. A koordináták origója a vevőkészülék elméleti pozíciója, a tengelyek pedig, a GPS koordináták szélességi és hosszúsági értékeit ábrázolják. A képernyő jobb felső harmadában láthatók a GPS vevőből érkező adatok NMEA formátumban. A jobb oldal középső harmada egy grafikon, mely az idő függvényében ábrázolja a DOP (Dilution Of Precision) (pontosság romlása) értéket, míg az alsó harmada a mérésben felhasznált műholdak számát ábrázolja az idő függvényében.



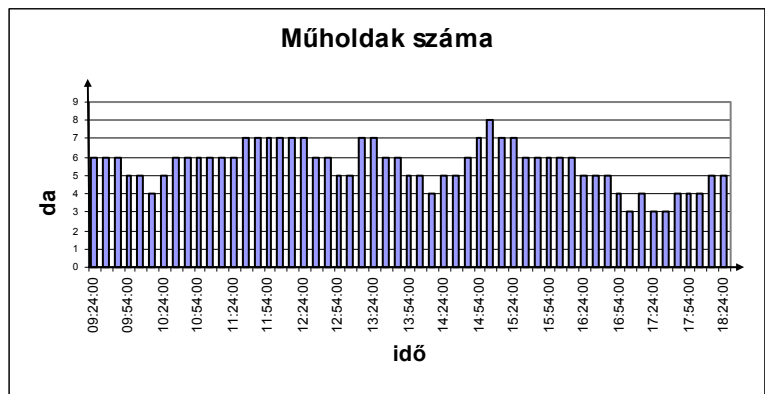
3.3. ábra: A mérések kiértékelő programja⁸²

⁸² A programot GPS készülékek pontosságának meghatározására készítette Molnár András.

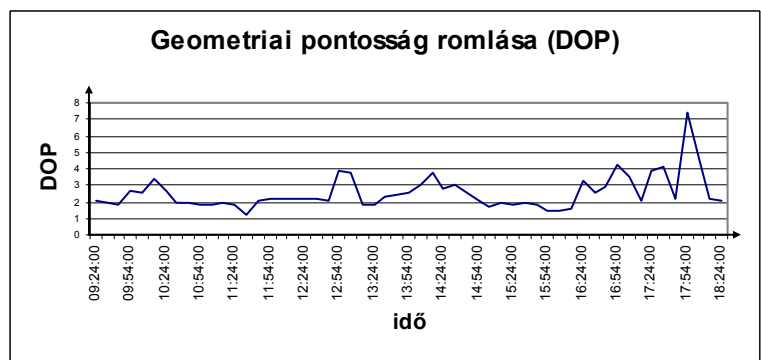
A 3.3. ábrán látható, hogy a mérési pontatlanság közel azonos mértékben és egyidejűleg jelentkezik mindkét koordináta irányban. Ennek köszönhetően alakul ki a -45 fokos egyenes környezetében elhelyezkedő ponthalmaz.

Az eredmények további elemzése során jól látható, hogy hogyan változik a pontosság az idő függvényében (3.2. diagram⁸³). Ennek oka, hogy a látható műholdak egymáshoz viszonyított helyzete nem állandó (3.3. diagram⁸³).

Az összehasonlítás érdekében hasonló méréseket végeztem „JUPITER” márkájú GPS vevőkészülékkel. A mérési körülményeket igyekeztem a lehető legprecízebben – az előző



3.2. diagram: Mérés során használt műholdak száma "NavStar" vevőmodul esetében⁸³



3.3. diagram: Mérés során tapasztalt DOP értékek "NavStar" vevőmodul esetében⁸³

	Szélesség	Hosszúság
Referencia pont (a mérés elméleti koordinátája)	47° 28,5908'	19° 3,4482'
Várható érték (a mért adatok alapján számítva)	47° 28.5937'	19° 3.4356'
Eltérés	0,004321	0,006391

Az eltérés az adott koordinátájú helyen (Budapesten) megfelel:

- 8,02 m szélesség mentén;
- 8 m hosszúság mentén.

3.1. táblázat: A "NavStar" GPS vevőkészülék által elért pontosság mértéke

méréshez hasonlóan – elvégezni. Természetesen a műholdak helyzete és száma általam nem befolyásolható tényező volt, így ebből adódó eltérések mutatkozhatnak, de az

⁸³ A méréseket 2003 nyarán végezte Molnár András.

eredmények jellege, az adatok tendenciáit nem befolyásolja. A „JUPITER” készülék esetében a mérés során több ízben is rendkívül magas DOP értékek jelentek meg, noha a holdak száma ezt nem indokolta. Sajnos az adott időpontban látható holdak pozíciójáról nem volt információ, így a műhold konstellációkat nem tudtam figyelembe venni, ami valószínűsíthető oka volt a magas DOP értékeknek.

Az összesített adatok alapján megállapítható, hogy a két vevőkészülék pontossága jelentősen eltér (a NavStar pontossága közel kétszerese a JUPITER-nek) egymástól (3.1-3.2. táblázat⁸⁴).

	Szélesség	Hosszúság
Referencia pont (a mérés elméleti koordinátája)	47°28,5908'	19°3,4482'
Várható érték (a mért adatok alapján számítva)	47°28,5874'	19°3,4524'
Eltérés	0,007788	0,011594
Az eltérés az adott koordinátájú helyen (Budapesten) megfelel: <ul style="list-style-type: none"> - 14,55 m szélesség mentén; - 14,42 m hosszúság mentén. 		

3.2. táblázat: A „JUPITER” GPS vevőkészülék által elért pontosság mértéke⁸⁴

A fenti mérések tapasztalatai alapján látható, hogy a GPS vevők 15 m alatti pontosságot biztosan elérnek. Adatlapok alapján ez a pontosság jobb, mint 3-5 m. Repüléstechnikailag ez a pontosság maximálisan elegendő.

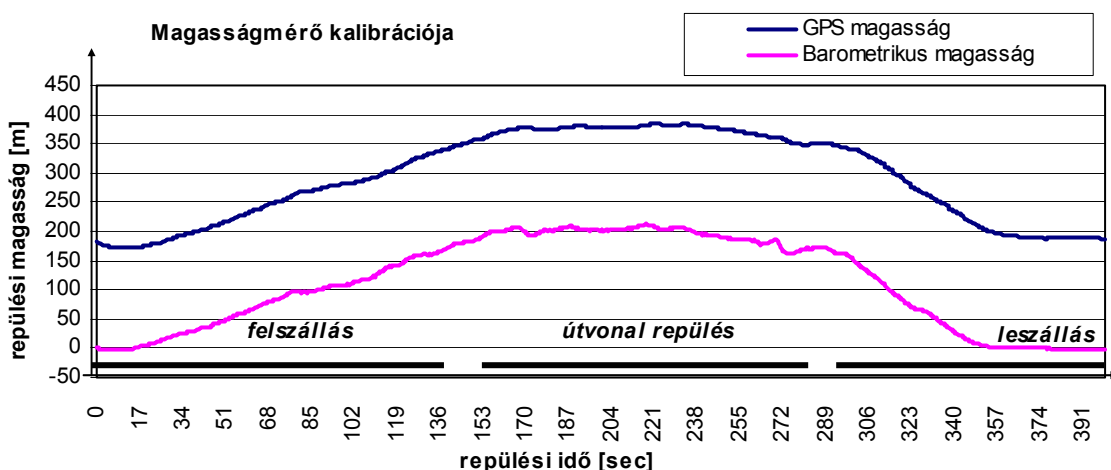
⁸⁴ Az adatokat 2003 nyarán meghatározta Molnár András.

3.2. Tesztrepülések az MP2000 robotpilóta egységgel

Az MP2000 (MicroPilot 2000) egy Kanadai gyártású kisméretű repülőgépekhez kifejlesztett navigációs és repülés-stabilizáló eszköz [3]. Az MP2000 rendelkezik GPS modullal, sebesség- és magasságmérő szenzorokkal, gyro-szenzorokkal, fedélzeti adatgyűjtővel, valamint a további bővíthetőség érdekében, csatlakozási lehetőséggel. Az eszköz gyártója nem specifikálta az MP2000-hez használható repülőgépet, amiből az következik, hogy a rendszer paraméterezhetősége igen széles körű, mellyel biztosítható egy kvázi tetszőleges repülőgéptípushoz történő adaptáció.

A kezdeti tesztrepülések célja a rendszer egyes egységei működőképességének vizsgálata, valamint a szenzorok kalibrációja volt. A fedélzeti GPS nem igényel kalibrációt, így annak adatai biztosították a referenciákat. A repülés során legfontosabb paraméterek a sebesség és a magasság. A méréseim során az alábbi megállapításokra jutottam:

A magasság kalibrációja esetén figyelembe kell venni, hogy a GPS magasság nulla pontja a tengerszint, míg az MP2000 barometrikus magasságmérő egysége minden bekapcsolást követően automatikusan az adott helyszínt tekinti nulla méternek. Ez azt jelenti, hogy a GPS és a barometrikus magasságmérő által mutatott értékek a repülés helyszínének tengerszinttől mért magasságával térnek el egymástól!

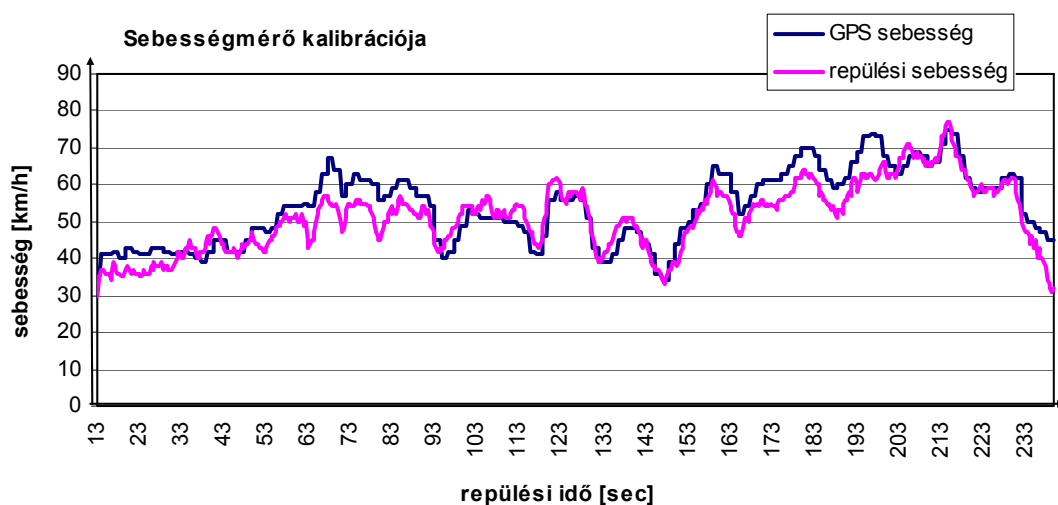


3.4. diagram: GPS és barometrikus magasság⁸⁵

A 3.4. diagram⁸⁵ egy tesztrepülés alatt mért magasságértékeket szemlélteti. A kék vonal a GPS által mért magasságot, míg a lila vonal a barometrikus magasságot mutatja. A

⁸⁵ Az adatokat kiértékelte Molnár András.

két magasságsdiagram között közel állandó, 180 méter különbség látható. A fentiek értelmében látható, hogy a starthely magassága tengerszinttől számított 180 méter. A grafikont elemezve az is jól látható, hogy a GPS-es magasságmérés egyenletesebb, mint a barometrikus. Ez az eltérés látszólagos. A különbség oka, hogy a GPS másodpercenként háromszor mér, míg a barometrikus szenzor ettől jóval többször. Ebből következik, hogy a barometrikus magasságmérés időbeni felbontása finomabb, azaz részletesebb! Hasonló eredményt mutatott a GPS és a torlónyomás mérés által meghatározott sebességmérés (3.5. diagram⁸⁶). A sebességi grafikonok elemzése során jól látható, hogy a repülés bizonyos fázisaiban a GPS sebesség nagyobb, mint a repülési sebesség, más fázisokban ez éppen



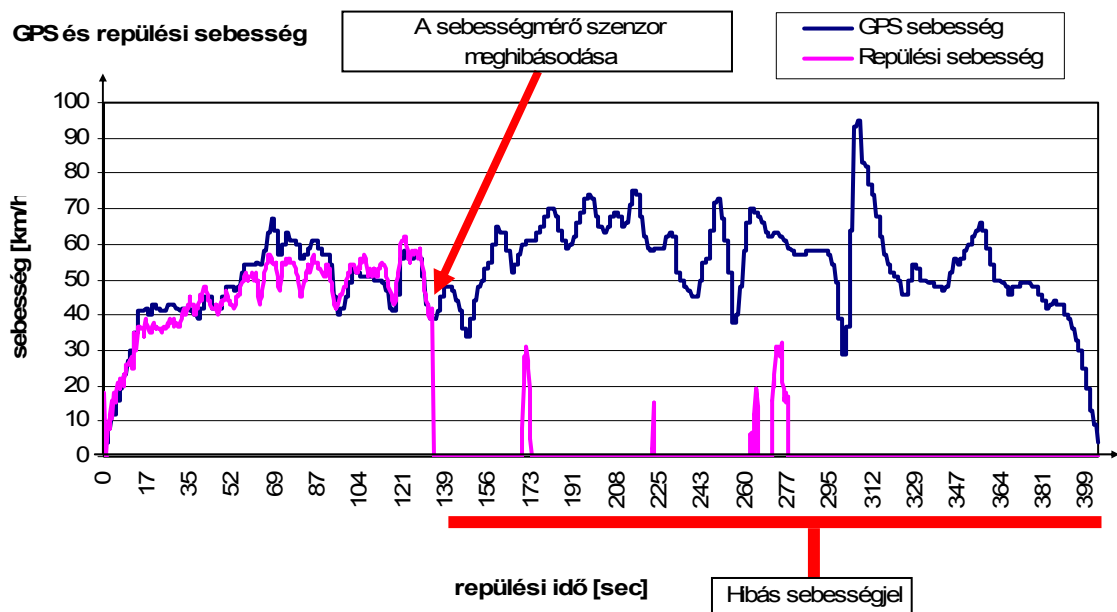
3.5. diagram: GPS és repülési sebesség⁸⁶

fordítva van, illetve található olyan fázis, ahol a kettő megegyezik. Mivel a GPS a földhöz viszonyított sebességet méri, az a szél irányától függően változik. Pontosabban, ha a repülő az éppen uralkodó széllel egy irányba halad, akkor a földhöz viszonyított sebesség nagyobb, mint amikor a repülő épp a szél irányával ellentétes irányban halad.

Repüléstechnikai szempontból azonban lényeges tudni, hogy a repülőgép az őt körülvevő levegőhöz képest mekkora sebességgel halad. Ezt a sebességet nevezhetjük repülési sebességnek, mely adott beállítások mellett a szél sebességétől függetlenül állandó. A két mérés között tehát az éppen uralkodó szélirány és a sebesség különbsége látható. Bár az MP2000 nem rendelkezik szélesebesség és szélirány meghatározási funkcióval, az általa rögzített adatok alapján ez lehetséges lenne. Természetesen a leszállást követően a tárolt adatok alapján ezek a jellemzők meghatározhatóak.

⁸⁶ Az adatokat kiértékelte Molnár András.

A repülések során az MP2000 használati utasításában meghatározott lépések szerint elvégzett ellenőrzéseket követően a szabályzókörök beállítása következett. Ennek lépéseit ugyan tartalmazza a mellékelt leírás, de a rendkívül magas paraméterszám, valamint a szabályzókörök egymásra hatása miatt a beállítás rendkívül nehézkes. Az első lépés a magasságtartás beállítása volt. Ennek beszabályozása több mint 2 repült órát igényelt. A repülések során jelentkeztek konstrukciós hiányosságok miatt fellépő problémák. Mivel a leglényegesebb paramétereket a rendszer két külön egységgel is meghatározza, sikerült észrevenni a sebességmérő szenzor sérülését. Ezt a hibát a motor által keltett vibrációból fakadó anyagfáradásos törés okozta. A 3.6. diagramon⁸⁷ jól látható, hogy a sebességmérő meghibásodásának pillanata, illetve az azt követő jel alakja. Bár a két adat összehasonlítása, valamint a grafikonok jellege egyértelműen lehetővé teszi a hibás egység kiválasztását, az MP2000 nem rendelkezik ilyen funkcióval. A tesztrepülések során sokszor nem lehetett tudni, hogy az adott feladatot azért nem hajtja-e végre a repülő, mert a módosított paraméterek nem voltak megfelelőek, vagy, mert a sebességmérő szenzor



3.6. diagram: A repülési sebesség szenzorának meghibásodása⁸⁷

meghibásodott.

A tesztelések során megállapítottam, hogy az MP2000 egy sokoldalú robotrendszer, mely felépítését tekintve klasszikus irányítástechnikai rendszernek mondható. A tervezők által biztosított apró részletekig terjedő beállítási lehetőségek megfelelően pontos repülővezetést tesz lehetővé. Ugyanakkor a beállítások bonyolultsága végfelhasználói szempontból kedvezőtlen.

⁸⁷ Az adatokat kiértékelte Molnár András.

Következtetések

A műholdas navigációs rendszerekkel végzett méréseim alapján az alábbi megállapításokat tettem:

- A GPS rendszer megbízhatóan és reprodukálhatóan biztosítja a helymeghatározást, ezért alkalmas robotrepülőgépek pozíciójának meghatározására.
- A kereskedelemben kapható **GPS vevő készülékek pontossága** és mérési sebessége adott sebességhatárok között **alkalmas robotrepülőgépek** valósidejű **navigációs rendszeréhez**.
- A kísérletek során **megállapított ± 8 méter pozícióhiba nem biztosítja az automatikus leszálláshoz szükséges pontosságot**, így az automata leszállórendszer kiépítéséhez **további, nagyobb pontosságot biztosító alrendszerek szükségesek**.
- A kanadai gyártmányú robotrepülőgéppel végzett kísérletek igazolták, hogy a fedélzeti GPS mérések összhangban vannak a hagyományos (barometrikus magasság és pitotcsöves sebességmérés) módszerek mérési eredményeivel.
- A robotrepülőgép fedélzeti egységének beállítása bonyolult, speciális tudást igénylő szakembert feltételez.

Az MP2000 tapasztalatai alapján **célul tűztem ki egy**, úgynevezett **„felhasználóbarát” robotpilóta egység kifejlesztését**, mely funkcionálisan rendelkezik az MP2000 tulajdonságaival, de a végfelhasználó szempontjából csak kevés, magas szintű paraméter beállítását teszi szükségessé. A beállítást biztosító felületet a felhasználó szemszögéből valósítottam meg, így az irányítástechnikai szemléletet igénylő paraméterek rejtve maradtak.

IV. Az „AEROBOT”, kísérleti robotpilóta egység felépítése

A rendszer feladata kettős. Biztosítani kell a repülés minimális feltételeit, valamint a repülőgépet az előre meghatározott útvonalon kell tartani. A tradicionális robotpilótáknál ezeket a feladatokat önálló egységek valósítják meg [22].

Az új rendszer a navigációs és repüléstabilizációs feladatokat egy, logikailag nem szétválasztható egységgel valósítja meg. Ennek előnye, hogy lényegesen kevesebb szabályzókörrrel, szenzorral és számító modullal lehet implementálni. A rendszer működéséhez három alapvető egységnek kell rendelkezésre állnia.

- **Nagy stabilitással rendelkező repülőgép, mely szerkezetéből adódóan képes a stabil repülésre. Más szavakkal: a repülőgépnek képesnek kell lennie a légköri zavarok pilóta, illetve elektronikai beavatkozás nélküli kompenzálására.**
- **A repülőgép fedélzetén lennie kell olyan GPS (Global Positioning System) rendszernek, amely képes előre beprogramozott útvonal követésére.**
- **A robotpilóta primer adatait alapvetően a GPS rendszertől, valamint a fedélzeti sebesség és magasságmérőből kapja.**

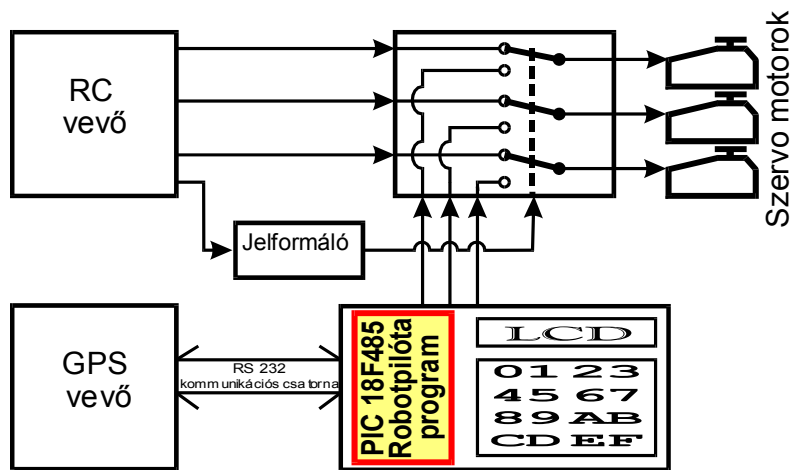
Bár nem szükséges, de célszerű a repülőgép vezetésére távirányítási opciót fenntartani. Ennek érdekében a robotpilóta-rendszer tartalmaz további két egységet.

- **Rádióvevő készülék, mely a távirányító jeleit fogadja, és vezérli a repülőgép szervóit.**
- **Kapcsoló egység, mely a kormányokat mozgató szervók vezérlését átkapcsolja a robotpilótáról a távirányítóra, illetve a távirányítóról a robotpilótára.**

A robotrepülőgéppel szemben támasztott elvárások a következők:

- **Távirányítással megvalósított fel- és leszállás.**
- **Előre beprogramozott útvonal (nyomvonal) automatikus követése.**
- **Az automatikus repülés során megengedhető eltérések:**
 - **±10 méter magasságváltozás,**
 - **±15 km/h sebességváltozás,**
 - **±30 m nyomvonaltól való eltérés,**
 - **fordulópontok legalább 50 méter sugarú megközelítése.**
- **Időjárási viszonyok: 30 km/h szélesebbesség, maximum 10 km/h lökésség .**

A 4.1. ábrán a robotpilóta-rendszer blokkvázlata látható. A rendszer három kormányt – vízszintes és függőleges vezérsíkok, valamint hajtómű teljesítményt – kezel. Mind az elektronika, mind pedig, a számítási modellek lehetővé teszik további kormánysszervek – például csűrő – bekötését. A folyamatos fejleszthetőség érdekében a robot központi elektronikáját úgy terveztem meg, hogy a későbbiek folyamán ahhoz könnyen lehessen további egységeket csatlakoztatni.



4.1. ábra: A robotpilóta-rendszer blokkvázlata⁸⁸

A blokkvázlaton (4.1. ábra⁸⁸) látható, hogy a távirányító (Remote Control - RC) vevőjének egyik csatornája kapcsolja ki, illetve be a robotpilótát. A kapcsolás csak formális, mivel csak a vezérlőjelek átkapcsolása történik meg. Valójában a robotpilóta folyamatosan üzemel, így

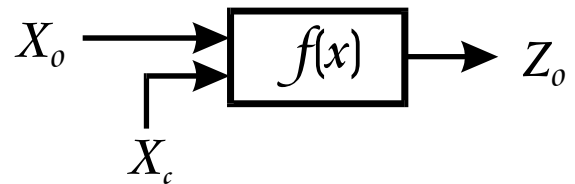
átkapcsoláskor nincs tranziens idő, más szavakkal, nem kell várni a robotrendszer „feléledésére”.

Hagyományos rádióvevők esetében az átkapcsolás nem működne megfelelően, mivel a vevő folyamatosan igényelné a távirányító jeleit, hogy az átkapcsoló csatornáján a megfelelő kimenet előállhasson. Ezt a problémát egy digitálisan programozható vevő oldja meg, melynek kimenetei vételkimaradás esetén automatikusan beállnak egy előre programozott állapotra. A vevő programozása úgy történt, hogy a vevő megfelelő csatornájának kimenetén a robotpilóta bekapcsolásának jele megegyezzen a vételkimaradáskor megjelenő jellel. Így nemcsak a kezelő kapcsolhatja át távirányító segítségével a rendszert robotpilótára, hanem rádiózavar, vagy gyenge, illetve megszűnt távirányítójel is kiváltja az átkapcsolást.

⁸⁸ A robotegység rendszertervét készítette Molnár András.

4.1. Szabályzókörök átviteli függvényei

A szabályzókörök alapvető feladata, hogy az adott paramétereket (sebesség, magasság, irány) egy előre meghatározott értéken tartsák. A szabályzó egység reprezentálható egy függvénnyel is, melynek változói a szabályozni kívánt jellemző pillanatnyi, valamint célértékei (4.2. ábra). A 4.2. ábra értelmében az $f(x)$ függvényt a továbbiakban átviteli függvénynek nevezem. Az átviteli függvény meghatározása során több szempont együttes figyelembevétele szükséges. Ezek az alábbiak:



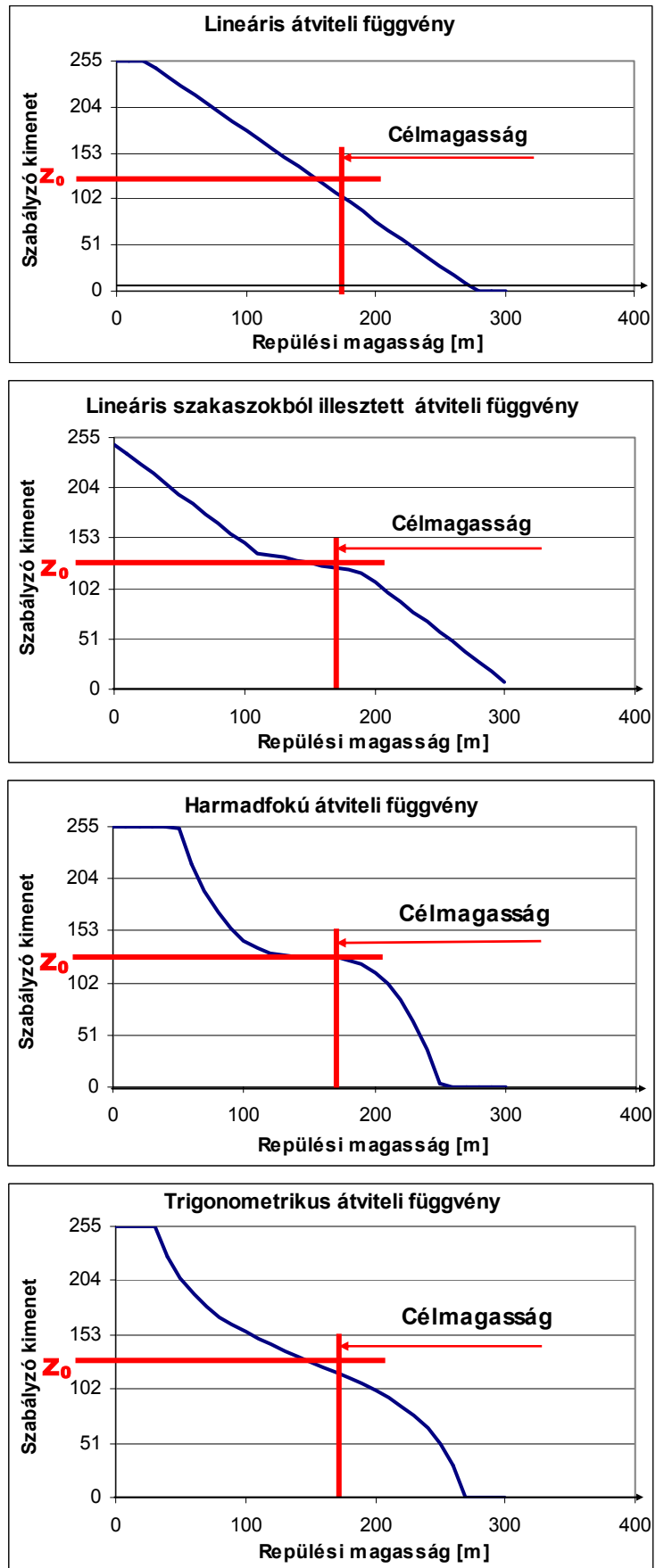
4.2. ábra: A szabályzó átviteli függvényének meghatározása

- A függvény számításigénye ne haladja meg az alkalmazott számítógésség kapacitását.
- A függvény által generált szabályzójel (Z_0) legyen arányos a hiba (célérték (X_c) és pillanatnyi érték (X_0) különbsége) mértékével.
- A függvény legyen folytonos, és a lehető legkevesebb függvényösszetélt tartalmazza.
- A függvény legyen könnyen paraméterezzhető, hogy az adott szabályozási feladathoz a lehető legjobban lehessen illeszteni.

Az átviteli függvény meghatározása érdekében megvizsgáltam több lehetséges megoldást. Minden megvizsgált függvény jelleggörbáját egy-egy diagramon ábrázoltam (4.1. diagram). A függvények ábrázolását a magasságszabályozás kapcsán mutatom be. A diagramokon megjelöltem a célmagasságot ($X_c=150$ m), valamint az ahhoz tartozó neutrális kimeneti értéket ($Z_0=128$). Amennyiben a célmagasság értéke magasabb a pillanatnyilag mért magasságértéknél, akkor a kimeneti jel értéke magasabb lesz, mint a neutrális kimeneti érték. Abban az esetben, ha a célmagasság kisebb, mint a pillanatnyilag mért magasság, akkor a kimeneti jel értéke alacsonyabb lesz a neutrális kimeneti értéknél. A továbbiakban, ha a kimeneti jel értéke meghaladja a neutrális kimeneti értéket, akkor a beavatkozás pozitív, ellenkező esetben a beavatkozás negatív.

4.1.1. Lineáris átviteli függvény

A legegyszerűbb átviteli függvény a lineáris függvény. Számításigény szempontjából ideális, mivel csak szorzást és összeadást igényel. A függvény paramétereizhetősége egyszerű. Két paraméter segítségével lehet a függvény meredekségét és az eltolását beállítani. Hátránya, hogy a beavatkozó jel lineárisan függ a hiba mértékétől. Ennek gyakorlati következménye, hogy a lineáris átvitelű szabályzórendszer nem lesz képes széles dinamikájú zavarások korrigálására. A függvény meredekségével beállítható a beavatkozás mértéke. Kísérletekkel, valamint szimulációkkal beállítható a gerjedésmentes működést biztosító függvény, de ennek meredeksége még nem teszi lehetővé a rövid és nagy intenzitású zavaró hatások korrekcióját. Annak érdekében, hogy az intenzív zavaró hatásokra jól reagáló rendszert kaphassunk, növelni kell a függvény meredekségét, de az gerjedéshez vezet.



4.1. diagram: Átviteli függvények⁸⁹

⁸⁹ Az átviteli függvények elemzése során készült diagramokat készítette Molnár András.

4.1.2. Lineáris szakaszokból illesztett átviteli függvény

A lineáris függvény dinamika-tartománya kiterjesztésének egy lehetséges módja, ha az átviteli függvényt több, lineáris függvény összetételéből képezzük. Megfelelő függvényösszetétellel létrehozhatók eltérő meredekségű szakaszok. Az így kialakított átviteli függvény dinamika-tartománya széles határok között mozoghat, megőrizve a lineáris függvény számításigényének minden előnyét. A függvényösszetétel hátránya, hogy a teljes átviteli függvény globális paramétereit nehéz kezelni, mert azok valójában az önálló függvények lokális paramétereiből képezhetők. További hátrányt okoz a folytonosság biztosítása. A függvények találkozási pontjaiban akár a számítási kerekítésből, akár a nem megfelelő határértékek meghatározásából szakadások keletkezhetnek. Ezek a szakadások sok esetben tesztelés során sem azonnal mutathatók ki, és általában ritkán előforduló, „megmagyarázhatatlan” hibák forrásai lehetnek.

4.1.3. Harmadfokú átviteli függvény

A harmadfokú függvény jellege megfelel a lineáris szakaszokból illesztett átviteli függvénynek. Előnye, hogy folytonossága az adott működési tartományon belül egyszerűen belátható. A harmadfokú függvény számításigénye valamivel nagyobb, mint a lineárisé, de ez a mai modern számítógépek teljesítményénél nagyságrendekkel kisebb. Paramétereizhetőség tekintetében a harmadfokú függvény kedvezőbb, mint a lineáris függvények kompozíciója, mivel három együtthatóval a függvény széles határok között alakítható.

4.1.4. Trigonometrikus átviteli függvény

A trigonometrikus függvények közül a $-\frac{\pi}{2}$ és $\frac{\pi}{2}$ intervallumban a tangens függvény jellege felel meg leginkább az adott szabályzó átviteli függvényének. A tangens függvény az adott tartományban folytonos, továbbá paramétereizhetősége is egyszerű. A tangens függvény tetszőleges pontosságú meghatározása igen számításigényes. A számítások meggyorsítása érdekében ismert módszer az úgynevezett „tangens táblázat” alkalmazása. Ennek lényege, hogy az adott intervallumon belül, előre meghatározott felbontással egy táblázat tartalmazza a tangens értékeket, így a függvény kiszámítása gyakorlatilag a táblázatban való keresést jelenti. Megfelelő kereső algoritmus alkalmazása

esetén a függvényérték meghatározása gyors. A módszer hátránya, hogy a táblázat viszonylag sok tárhelyet igényel, ami a fedélzeti számítógéység esetében erősen korlátozott mértékben áll rendelkezésre.

Az átviteli függvények vizsgálata során, a fent leírtak figyelembevételével, a harmadfokú függvény bizonyult a legkedvezőbbnek.

4.2. Magasságtartás

Rendhagyó módon a magasságtartás a hajtómű teljesítményének szabályozásával történik. Ennek oka, hogy hajtóműhiba esetén nem jöhet létre átesés.

A módszer elve a következő. Adott repülőgép esetében vízszintes repüléshez a szárny metszetétől függő sebesség és hajtómű-teljesítmény szükséges. Amennyiben a repülőgép kormányfelületein nem módosítunk, a hajtómű-teljesítmény változtatása emelkedést, illetve süllyedést idéz elő.

A magasságtartás primer adata a GPS rendszertől érkező pillanatnyi magasság. Ez az adat GPS-től függően a műholdak alapján számított magasság, vagy egyes GPS-ek esetében barometrikus magasság. A robotpilóta folyamatosan hasonlítja össze a mért magasságot a beállított magassággal, és az eltérésnek megfelelően az alábbi függvény (6) alapján vezérli a hajtómű teljesítményét.

$$K_m = \begin{cases} ha [((A_{GPS} - A_{ref}) * M_0)^3 + M_1] > 255, akkor 255, \\ ha [((A_{GPS} - A_{ref}) * M_0)^3 + M_1] < 0, akkor 0, \\ különben ((A_{GPS} - A_{ref}) * M_0)^3 + M_1, \end{cases} \quad (6^{90})$$

ahol

K_m : a hajtómű vezérlőjele 0 és 255 közé normálva,

A_{GPS} : a mért magasság [m],

A_{ref} : a beállított magasság [m] (a repülőgépnek ezen a magasságon kell repülnie),

M_0 : a szabályzás meredekségét (érzékenységét) állító faktor,

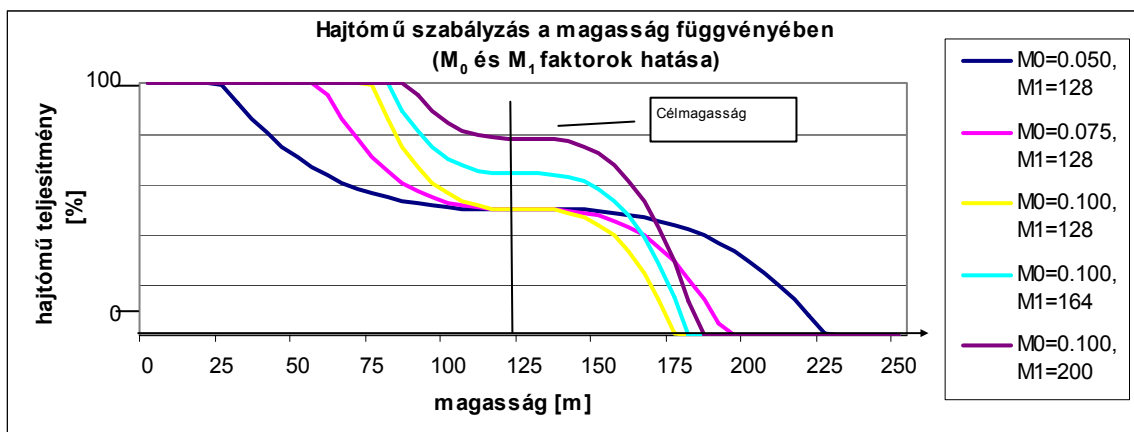
M_1 : a lineáris eltolás.

Repülőgépek szabályozástechnikájában nem szokványos harmadfokú függvények alkalmazása. A gyakorlatban a teljes szabályozási tartományt lefedő, lineáris szakaszokkal

⁹⁰ A harmadfokú szabályzófüggvényt meghatározta Molnár András.

közelítő függvények kompozíciója a jellemző. Ennek oka főként a viszonylag egyszerű matematikai modell, és a kivitelezhetőség.

A számítástechnika fejlődésével a magasabb hatványú függvények kezelése és az ilyen függvényeket tartalmazó szabályzókörök elemzése, tesztelése gyorsá vált, ami lehetővé tette azok közvetlen alkalmazását. Az egy átviteli függvénnyel megvalósított szabályzó további előnye, hogy nem kell vizsgálni a lineáris szakaszok illeszkedési pontjainak viselkedését, ami nagymértékben csökkenti a rejtett, a függvényösszetételek tranzienseiből adódó hibák lehetőségét.



4.2. diagram: A hajtómű szabályzásának diagramja a sebesség függvényében⁹¹

A 4.2. diagram⁹¹ alapján látható, hogy a szabályzó „M₀” és „M₁” paraméterei miként hatnak a szabályzás karakterisztikájára. Az „M₁” faktor segítségével lehet beállítani a szabályzót az adott repülőgép vízszintes repüléséhez szükséges motorteljesítményre. Ez az érték nem kritikus. Az „M₁” változtatásával gyakorlatilag a vízszintes repüléshez tartozó sebesség állítható be. Túl alacsonyra választott motorteljesítmény esetében a repülőgép nem lesz képes a vízszintes repülésre. Túl nagy érték esetében viszont hirtelen és nagy magasságváltozásokkal fog reagálni a zavaró hatásokra. Az „M₀” értékének módosítása a szabályzó beavatkozásának erősségét, „agresszivitását” változtatja meg. Ennek az értéknek a növelése fokozza a szabályzó gerjedési hajlamát! Mindkét értékének a beállítását minden géptípushoz egyénileg kell meghatározni a tesztrepülések során. A szabályzó jelleggörbéjéből kivehető, hogy alapvetően három különböző meredekségű egyenessel közelíthető. Kis mértékű zavarások esetén a viszonylag kis meredekségű szakasz hatása érvényesül, míg nagyobb eltérések esetében a szabályzó agresszívebb beavatkozását a meredekebb szakaszok biztosítják. A jelleggörbék két vízszintes tartománya a szabályzó

⁹¹ A harmadfokú szabályzófüggvény jelleggörbéje, valamint a paraméterek hatásai. A függvény vizsgálatát végezte Molnár András.

fizikai képességeinek korlátai miatt jelenik meg. Ezek gyakorlatilag megfelelnek a kormányok végállásainak.

4.3. Sebességtartás

A repülőgép sebessége az egyik legfontosabb repülési paraméter. Ennek megfelelő értéken tartása közvetlen hatással van a repülési képességre. Éppen ezért a sebesség szabályozási rendszerében a meghibásodás lehetőségét minimálisra kell csökkenteni. A rendszertől elvárt, hogy hajtómű hiba esetén is képes legyen a sebesség megfelelő szinten tartására. Ebből következik, hogy a sebességszabályozó rendszer beavatkozó szerve a magassági kormány lesz. Mivel a magassági kormány állítása gyakorlatilag a repülőgép állásszögét változtatja, ami közvetlen hatással van a felhajtóerőre, állandó motorteljesítmény mellett mind a magasság, mind pedig, a sebesség változik. Következésképp, a rendszer csak akkor biztosítja a vízszintes repülést, ha mind a sebesség, mind pedig, a magasságszabályozó rendszer üzemképes. Ugyanakkor a módszer jelentős előnye, hogy hajtóműhiba esetén nem lassulhat le a gép. A sebesség megtartása ebben az esetben a helyzeti energia rovására történik, ami azt jelenti, hogy a repülő egy olyan sikló pályán halad, ami folyamatos magasságvesztéssel jár.

A sebességtartó rendszer jellegét tekintve megegyezik a magasságtartó rendszerrel. A primer adatokat vagy a GPS szolgáltatja, vagy egy pitotesöves érzékelő. A robotpilóta az alábbi függvény (7) szerint vezérli a magassági kormányt.

$$K_v = \begin{cases} ha [((V_{GPS} - V_{ref}) * S_0)^3 + S_1] > 255, akkor 255, \\ ha [((V_{GPS} - V_{ref}) * S_0)^3 + S_1] < 0, akkor 0, \\ különben ((V_{GPS} - V_{ref}) * S_0)^3 + S_1, \end{cases} \quad (7^{92})$$

ahol

K_v : a magassági kormány vezérlőjele 0 és 255 közé normálva (128 = semleges állapot),

V_{GPS} : a mért sebesség [m/s],

V_{ref} : a beállított sebesség [m/s] (a repülőgépnek ezzel a sebességgel kell repülnie),

S_0 : a szabályzás meredekségét (érzékenységét) állító faktor,

S_1 : a lineáris eltolás.

⁹² A harmadfokú szabályzófüggvényt meghatározta Molnár András.

Az „S1” faktor beállítását úgy kell elvégezni, hogy a V_{ref} sebességgel vízszintesen repülőgép magassági kormány állása megegyezzen az ugyanilyen feltételekkel repülő, de távirányított üzemmódba kapcsolt repülő magassági kormány állásával. Az „S0” paraméter a szabályzó beavatkozásának erősségét befolyásolja. Ennek a paraméternek a növelése erősíti a szabályzó gerjedési hajlamát!

A faktorok változtatása mindkét szabályzókörré kihat. Előfordulhat, hogy viszonylag nagy „M0” faktor és alacsony „S0” faktoroknál a szabályzó még nem gerjed. Az „S0” növelésével gerjedés tapasztalható, de a gerjedés megszüntethető „M0” csökkentésével. Célszerű a szabályzók faktorait szimulátoron megvizsgálni.

4.4. Szimuláció

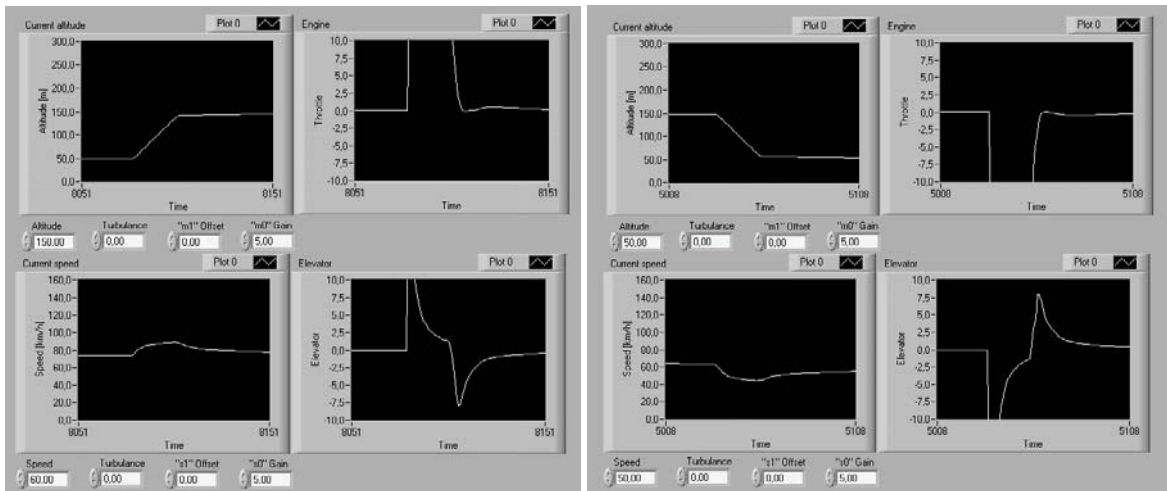
A magasság- és sebességszabályzás helytállóságát, illetve valós körülmények között várható viselkedését szimulációval célszerű megvizsgálni. A szimuláció előnye, hogy a folyamatokat tetszés szerint lehet lassítani, illetve akár lépésenként végrehajtani, ami beható tanulmányozást tesz lehetővé. Segítségével fény derülhet rejtett hibákra, illetve működés közben vizsgálhatók a rendszer-paraméterek módosításainak hatásai.

A National Instruments által gyártott LabVIEW program alkalmas mérnöki szimulációk megvalósítására.

A 4.1. kép az emelkedés és süllyedés szimulációs eredményét ábrázolja. A magasság-diagramon látható változás (külső parancs) hatására a hajtómű teljesítménye hirtelen megnő. Ez gyakorlatilag a szabályzórendszer közvetlen válasza az emelkedési parancs fogadására. Ennek hatására növekszik a repülőgép sebessége. A sebességszabályzó igyekszik a repülőt állandó sebességen tartani, és ennek beavatkozó szerve a magassági kormány. Következésképp, a szabályzó válasza a magassági kormány kimozdítása, amitől a repülőgép emelkedni kezd. A célmagasság elérését követően a hajtómű teljesítménye visszaáll az adott magassághoz és sebességhez megfelelő teljesítményre. A diagramokon látható, hogy mind a sebesség, mind pedig, a magassági kormány visszaáll a parancs fogadása előtti állapotba. A süllyedés szimulációja azonos eredményű az emelkedésével.

Repülési magasság

Hajtómű fordulát



Repülési sebesség

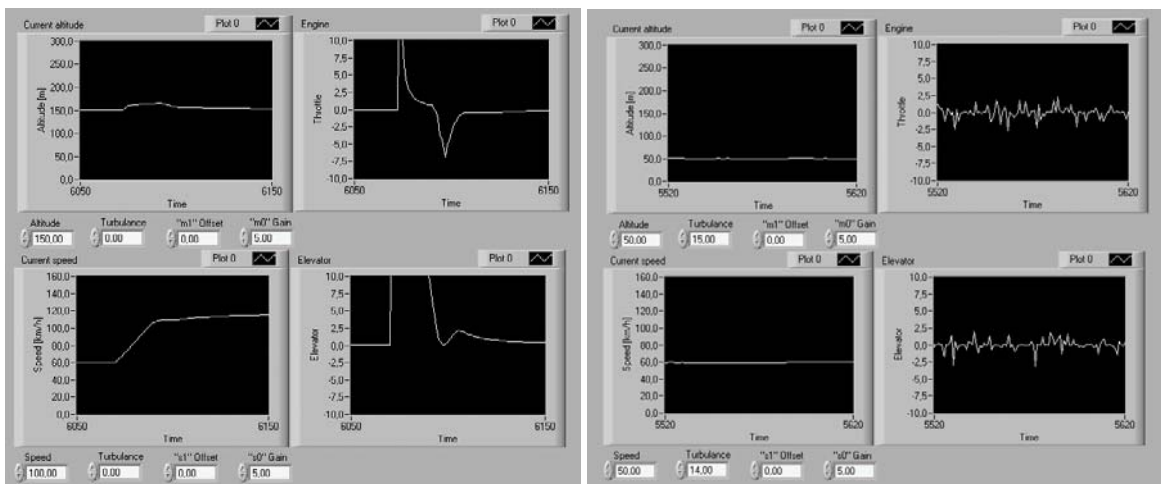
Magassági kormány

4.1. kép: Emelkedés és süllyedés szimuláció⁹³

A 4.2. kép⁹³ a sebességnövelési parancs (bal kép) és a turbulencia hatását (jobb kép) szemlélteti.

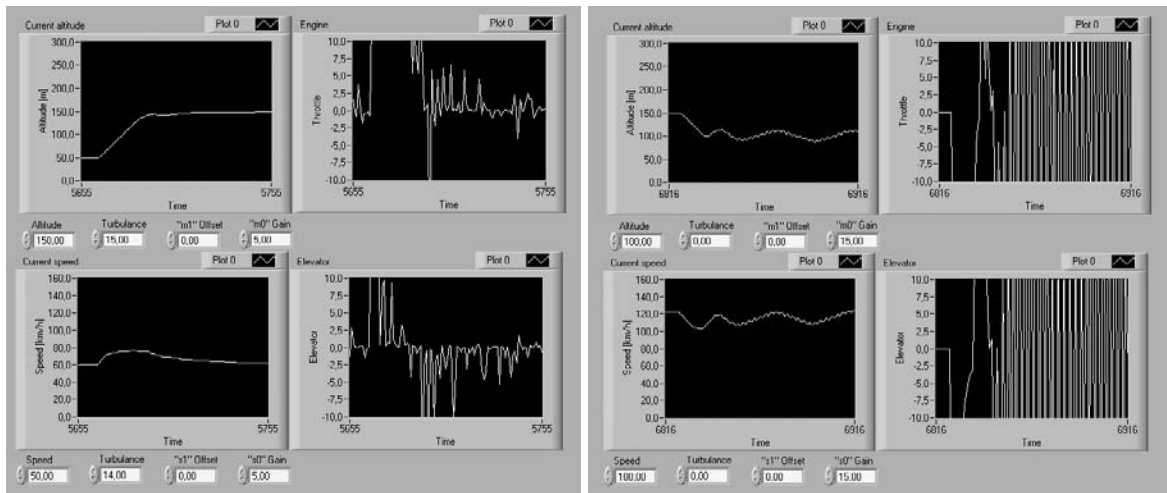
A sebesség növelésére kiadott parancs hatása hasonló eredményt mutat a magasságváltozás parancsának hatására. Természetesen ebben az esetben az elsődleges beavatkozó szerv a magassági kormány.

A turbulencia hatásának vizsgálata arra ad választ, hogy hogyan viselkedik a repülőeszköz külső, véletlenszerű hatásokkal szemben. Jól látható, hogy míg a beavatkozó szervek (hajtómű-teljesítmény, magassági kormány) állandó korrekciót hajtanak végre, a repülőgép magassága és sebessége állandó.



4.2. kép: Sebességnövelés és turbulencia hatása a vízszintes repülésre⁹³

⁹³ A szimulációt a LabView program segítségével készítette Molnár András.



4.3. kép: Emelkedés turbulens környezetben és a gerjedés vizsgálata⁹⁴

A 4.3. kép⁹⁴ a turbulens áramlási viszonyok között történő magasságváltoztatást (bal oldali kép) és a szabályzó hurokerősítés változásának hatását (jobb oldali kép) szemlélteti.

A magasság növelést jelző parancsot követően a rendszer reakciója megegyezik a 4.1. képen megismertekkel. A turbulenciának köszönhetően a beavatkozó egységek diagramja összetettebb, de jellegében változatlan.

A hurokerősítés növelése hatására a rendszer érzékenysége mindaddig növekszik, míg el nem éri a gerjedési pontot. Az oszcilláló sebesség és magasság jelzi, hogy a begerjedt szabályzó nem képes stabilizálni a repülőgépet.

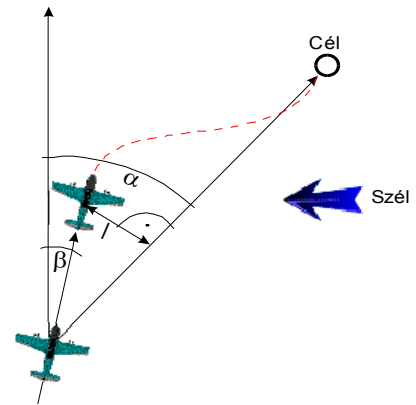
A gerjedés vizsgálat extrém paraméterek mellett történt. A valóságos rendszer üzemi körülményei (hurokerősítések és légköri zavarok) a normál, azaz gerjedésmentes tartományon belül vannak!

4.5. Útvonaltartás

A repülőgép adott útvonalon történő tartására elterjedt inerciális rendszerek alkalmazása nagy bonyolultságú és precizitású berendezéseket igényel. Mivel az inerciális rendszerek kumulálják a rendszer mérési hibáit, az érzékelőknek és azok erősítőinek igen nagy pontossággal és alacsony zajszinttel kell működniük. Ez a tény jelentősen megnöveli ezen rendszerek költségét.

⁹⁴ A szimulációt a LabView program segítségével készítette Molnár András.

A GPS rendszerű helymeghatározás biztosítja, hogy a repülőgép pillanatnyi pozíciójának meghatározása igen magas gyakorisággal (akár másodpercenként) megtörténhessen. Ez lehetővé teszi egy újszerű navigációs rendszer alkalmazását. A 4.3. ábra⁹⁵ szemlélteti azokat a GPS által mérhető repülési paramétereket (cél irány: α , repülési irány: β , útvonaltól való eltérés: l), melyek alapján meghatározható a repülőgép pillanatnyi eltérése a tervezett útvonaltól, valamint az eltérés várható tendenciája.



4.3. ábra: Navigáció⁹⁵

A szabályzórendszer átviteli függvénye (8) a GPS által szolgáltatott három adat (α , β , l) alapján képzí a hibajeleket (K_h), mely közvetlenül vezérli az oldalkormányt.

$$K_h = \begin{cases} ha (|\alpha - \beta| * h_0 + l * h_1) * h_2)^3 > 255, & \text{akkor } 255, \\ ha (|\alpha - \beta| * h_0 + l * h_1) * h_2)^3 < 0, & \text{akkor } 0, \\ \text{különben } (|\alpha - \beta| * h_0 + l * h_1) * h_2)^3, & \end{cases} \quad (8^{96})$$

ahol

- K_h : az oldalkormány vezérlőjele 0 és 255 közé normálva (128 = semleges állapot),
- α : a cél iránya fokban (a következő forduló, vagy a cél iránya Északhoz viszonyítva),
- β : a repülőgép pillanatnyi repülési iránya fokban,
- l : az eltérés a tervezett útvonaltól [m],
- h_0 : az irányszabályzás meredekségét (érzékenységét) állító faktor,
- h_1 : az útvonalszabályzás meredekségét (érzékenységét) állító faktor,
- h_2 : a globális meredekséget állító faktor (gyakorlati szempontból célszerű alkalmazni a szabályzó beállítása során).

A függvény (8) alapján látható, hogy hibajel két esetben keletkezhet. Az első eset, ha a repülés iránya (α) és a cél iránya (β) nem azonos. Mivel az l paraméter előjeles, a

⁹⁵ A navigáció során mért értékek szemléltetését készítette Molnár András.

⁹⁶ A harmadfokú szabályzófüggvényt meghatározta Molnár András.

hibajel az eltérés irányától függően előjelhelyes lesz, nagysága pedig az irányok különbségének és az eltérés mértékének összegétől függ. A h_2 faktor matematikailag felesleges, hiszen annak változtatása egyenértékű a h_0 és h_1 faktorok egyidejű, azonos mértékű változtatásával. A gyakorlati kezelés szempontjából azonban kényelmesebb egy globális erősítés állítási lehetőséget biztosítani.

Hasonló útvonal-szabályozó rendszerek már készültek hajókhoz [3]. Ez a rendszer önmagában repülőgép kormányzására nem lenne alkalmas, mivel az oldalkormány önálló mozgatása a repülőgép aerodinamikai kialakításától függően nem, vagy alig hatásos. Figyelembe véve a repülés sajátosságait, az útvonal-szabályozás, a magasságtartás és a sebességtartás együttes alkalmazásával mégis hatékony navigációs és repülésstabilizáló rendszer készíthető.

4.6. Az „AEROBOT” kísérleti robotpilóta egység működése

A robotpilótának alapvetően két üzemmódja van.

A távirányított üzemmód során az elektronika repüléstechnikai szempontból passzív. Ez azt jelenti, hogy a távirányító felől érkező jeleket csupán átereszti úgy, hogy azokon semmilyen módosítást nem hajt végre. Ekkor a rendszer csak egyetlen jelet figyel, mely segítségével átkapcsolható automatikus módba.

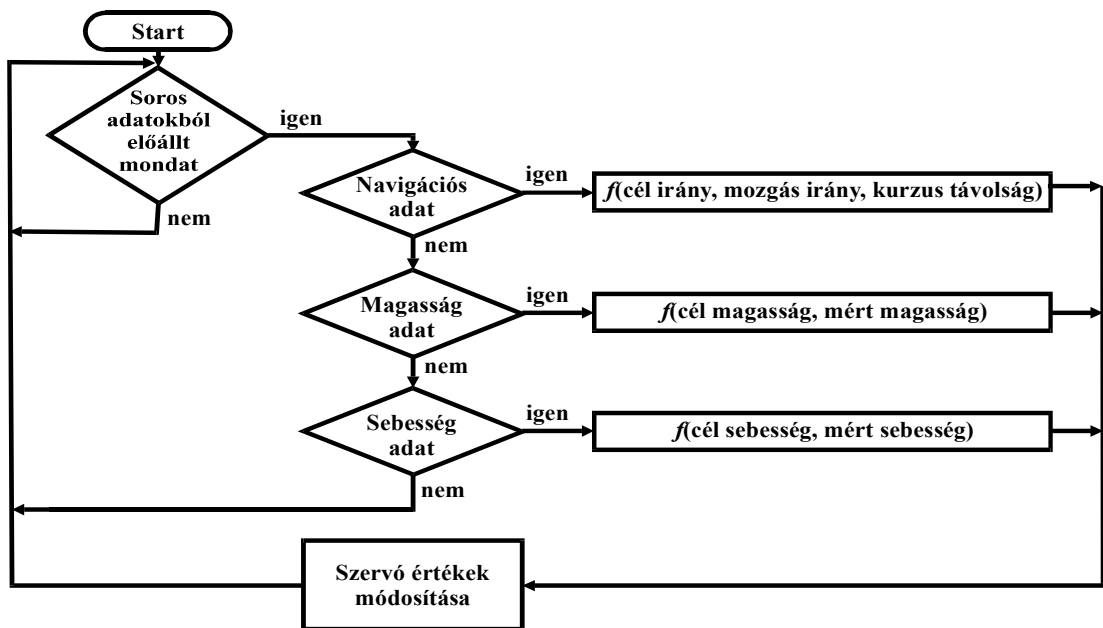
Az automatikus mód felel meg gyakorlatilag a robotpilóta üzemmódnak. Ebben az esetben a rendszer a távirányító felől érkező jeleket figyelmen kívül hagyja (kivéve, az átkapcsolást szolgáló jelet). Az átkapcsolás kétféle módon következhet be:

- Folyamatosan fennálló rádiókapcsolat esetén a távirányító megfelelő csatornájának kapcsolójele hatására, a kezelő bármikor átkapcsolhat robot, vagy távirányított üzemmódba.
- Amennyiben a rádiókapcsolat bármely okból megszűnik, a rendszer automatikusan robot üzemmódba kapcsol, melyet távirányított módba a kezelő csak a rádiókapcsolat újbóli létrejötte után tud kapcsolni.

A robotpilóta programjának elvi felépítését a 4.4. ábra⁹⁷ szemlélteti. Az ábrán látható „Soros adatokból előállt mondat” vizsgálati rész akkor folytatódik az „igen” ágon, ha a soros port megszakítási rutinja össze tudott állítani egy NMEA protokoll szerint

⁹⁷ A programot készítette Molnár András.

értelmezhető mondatot. Az átviteli hibákat is ez a megszakítási rutin kezeli le, így a fő modul csak szintaktikailag helyes NMEA mondatokat kap.



4.4. ábra: A robotpilóta fő programjának folyamatábrája

A szervók jeleit egy időzítő rutin hozza létre. Mivel ez a feladat időkritikus, annak végrehajtása a mikrokontroller belső időzítőjének megszakítására hajtódik végre. Ez a rutin a főmodulban szereplő „Szervó értékek módosítása” rutin által előállított adatoknak megfelelően alakítja ki az egyes szervók jeleit. A főmodulban jelölt $f(x)$ függvényeket megvalósító rutinok az előzőekben részletesen ismertetett módon hozzák létre a korrekciós eredményeket, melyek alapján számítható ki az egyes szervók vezérlőjelének konkrét értéke.

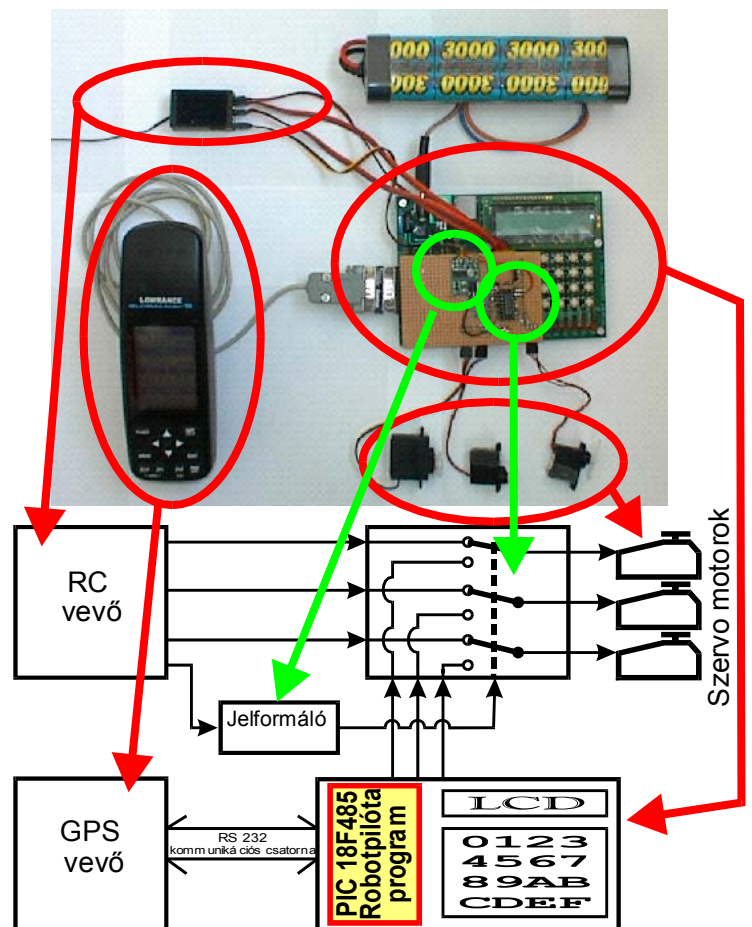
A repüléshez szükséges vezérlőjeleket (kormányozgató jelek) a fedélzeti szenzorok (barometrikus magasságmérő, légsebességmérő, GPS) adatai alapján a robotpilóta állítja elő. Az egység fényképe és funkcionális blokkvázlata a 4.4. képen látható. A robotpilóta központi modulját egy PIC 16F877 bázisú panel alkotja, mely többek között rendelkezik LCD modullal, illetve egy 4x4-es nyomógomb mátrix-szal a besabályzás megkönnyítése érdekében. A mikrokontroller 8 KB programmemóriával rendelkezik, és felépítését tekintve RISC (Reduced Instruction Set Computer). A 8 MIPS (Millions of Instructions Per Second) sebességű mikrokontroller képes ellátni a megfelelő számítási és adatgyűjtési feladatokat. Szűk keresztmetszetet a GPS adatszolgáltatási sebessége jelent, mivel az csak 3 NMEA mondat másodpercenként. A GPS kivételével a

teljes rendszer egyetlen energiaforrással üzemeltethető. Ennek nagy előnye, hogy jelentősen csökkenti a karbantartási feladatokat (csak egy akkumulátor töltése). A rendszer éledése 1 másodperc. Természetesen ez nem vonatkozik a GPS-re. Annak éledése típustól és üzemeltetési körülményektől függően akár egy perc is lehet. A GPS felprogramozása független a vezérlő elektronikától. Ennek megfelelően az útvonal beprogramozása nem kell, hogy feltétlenül a repülés előtti pillanatban történjen. A GPS eltávolítása lehetőséget biztosít arra, hogy annak programozását kényelmes körülmények között végezzék el. A GPS csatlakoztatása a robotpilótahoz bármikor megtehető. Nincs szükség sem a GPS, sem pedig a robot kikapcsolására. Mihelyst a robot RS232-es bemenetén megjelennek a GPS által szolgáltatott NMEA mondatok, az LCD-n láthatóvá válnak annak lényeges információi. Ebben a pillanatban a rendszer, repülésre kész.

A robotpilóta fedélzeti programja úgy lett kialakítva, hogy a berepülést követően nincs szükség további állítására. A mindenkori útvonal meghatározása a rendszerhez csatolt GPS-en keresztül történik. Ebből következik, hogy a végfelhasználónak nem feltétlenül kell rendelkeznie a rendszer és különösképpen a program ismeretével. Természetesen ez az ismeret elengedhetetlen a berepülést végzők számára.

A fedélzeti program beállítását a képen látható LCD panel és az alatta található nyomógomb-mátrix biztosítja (4.4. kép⁹⁸). Az áttekinthetőség és a könnyű kezelhetőség érdekében a program menüvezérelt.

A program menüterképét és állapotdiagramját a 4.5. ábra szemlélteti. Az ábrán a négyzetek az egyes képernyőket



4.4. kép: A robotpilóta felépítése⁹⁸

⁹⁸ A robotpilóta egységet készítette Molnár András.

szimbolizálják, a körök pedig, olyan funkciókat, melyek módosítják a rendszer működését, de nem váltanak új képernyőre. A nyílakhoz írott bekarikázott betűk jelölik azokat a nyomógombokat, melyek hatására az adott állapotváltozás bekövetkezik. Az egyes paraméterek módosítása a megfelelő állapotban a numerikus nyomógombokkal, az „A” gombbal, ami a tizedespontnak felel meg, valamint a „B” nyomógombbal, ami a visszatörlésnek felel meg, végezhető el. Az újonnan bevitt paraméterek azonnal érvényre kerülnek de kikapcsoláskor elvesznek. Ahhoz, hogy a módosítások eltárolódjanak, a „mentés” funkciót kell használni. A képernyőkön látható információk a következők:

Cél iránya fokban

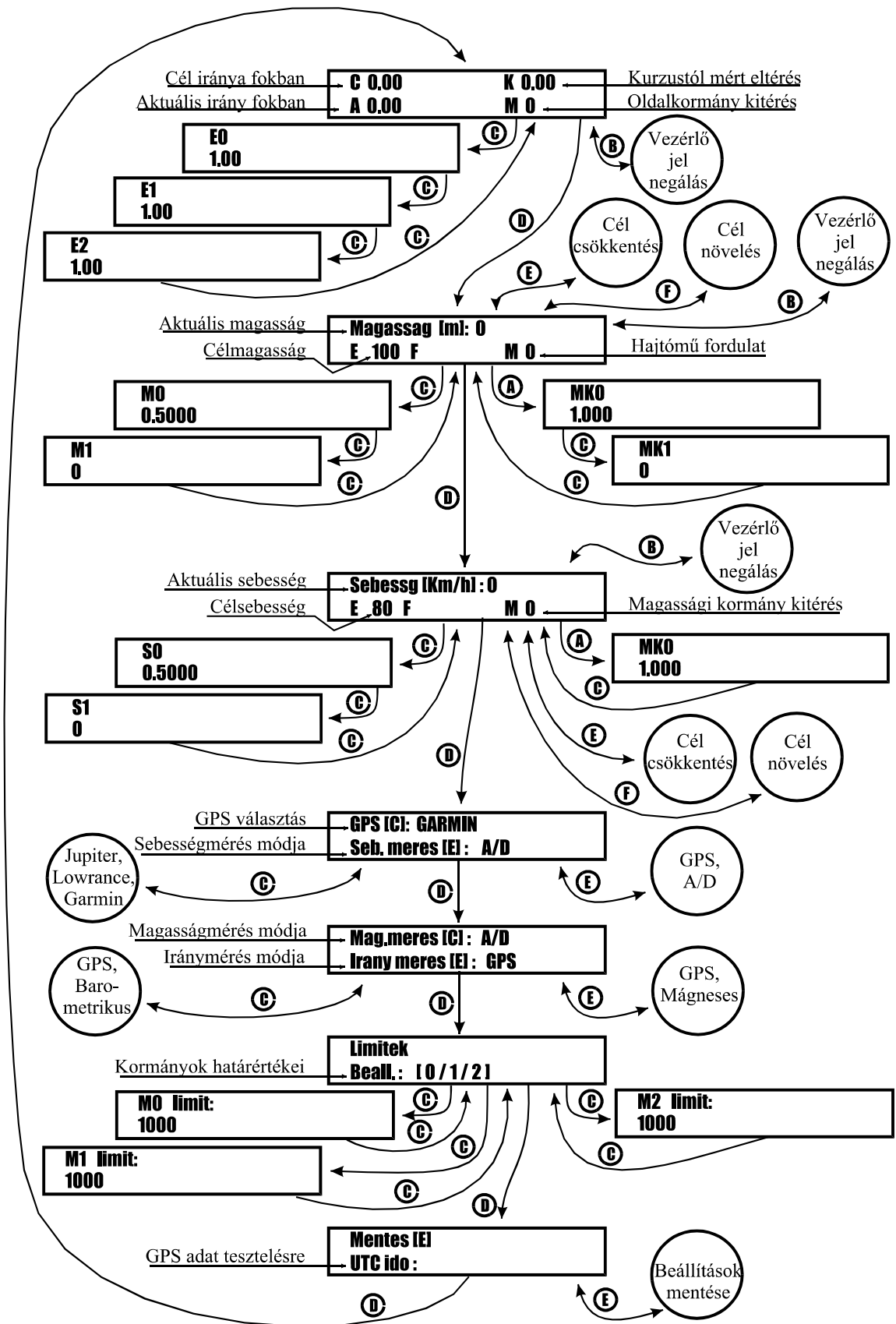
Az adatot a GPS szolgáltatja. Értéke megfelel a 4.3. ábrán α -val jelölt szögnek. A cél iránya mindaddig változatlan, míg a repülő el nem éri a soron következő fordulópontot. Ezt követően az éppen elért fordulópont lesz a kiindulási pont, a soron következő fordulópont pedig, a cél, mely iránya a 4.3. ábra szerint α szöggel értelmezhető.

Aktuális irány fokban

Az adatot a GPS szolgáltatja. Értéke megfelel a 4.3. ábrán β -val jelölt szögnek. Ez az érték gyakorlatilag a repülőgép pillanatnyi repülési irányát adja meg. A repülési irányt a GPS csak mozgás közben képes meghatározni mivel annak alapja az időközönként mért földrajzi koordináták elemzése. Egyes „GARMIN” GPS-ek lehetőséget biztosítanak mágneses irány meghatározására. Amennyiben a fedélzeti elektronika GPS beállításánál GARMIN készülék van beállítva, a rendszer átkapcsolható mágneses iránymérésre. Ebben az esetben az *Aktuális irány* értékét a GPS-be épített elektronikus iránytű szolgáltatja. A mágneses iránymérés előnye, hogy álló helyzetben is biztosít adatot, mely a repülőeszköz hossz tengelyének irányát jelenti. Hátránya, hogy beállási ideje, azaz jelfrissítési periódusa hosszú, így repülés közben pontatlan, megkésett adatokat szolgáltat.

Kurzustól mért eltérés

Az adatot a GPS szolgáltatja. Értéke megfelel a 4.3. ábra l -lel jelölt távolságnak.



4.5. ábra: A fedélzeti rendszer programjának állapotdiagramja⁹⁹

⁹⁹ A programot készítette Molnár András.

Oldalkormány kitérés

A szabályzó kimenetének értéke, mely alapesetben 0-1000 közötti tartományban lehet, de a határértékek módosítása esetén ez a tartomány csökkenhet. A kormány neutrális helyzetének az 500-as érték felel meg.

E0, E1, E2 értékek

Az $E0$, $E1$ és $E2$ paraméterek rendre megfelelnek az „Útvonaltartás” fejezetben megtalálható összefüggés (8) $h0$, $h1$ és $h2$ paramétereinek. A paraméterek megváltoztatásával az oldalkormány (bizonyos esetekben a csűrőkormány) szabályzóköreinek jellemzőit lehet változtatni.

A „D” nyomógomb egyszeri megnyomásával a magasság szabályzó képernyőjére kapcsolható a rendszer.

Aktuális magasság

Az adatot beállítástól függően a GPS vagy a fedélzeti elektronika magasságmérő szenzora szolgáltatja. A magasság méter dimenzióban jelenik meg. GPS adat esetében kalibrációra nincs szükség. Ebben az esetben a magasság értéke az átlagos tengerszinthez viszonyítva jelenik meg. A beépített szenzor használata esetében a megfelelő működés érdekében kalibrációra van szükség. Mivel a mérés elve légnyomásváltozáson alapul, bekapcsolását követően a rendszer méréseket végez, ami alapján a bekapcsolás pontja lesz a nulla méter.

Célmagasság

A célmagasság értéke méterben értendő. Az itt beállított magasságon fog a repülőgép repülni pontosabban a magasságtartás szabályzóköre ezen az értéken igyekszik tartani a gép aktuális magasságértékét. A beavatkozás a hajtómű teljesítmény változtatásán keresztül történik. A célmagasság értékét az „E” és az „F” nyomógombokkal lehet csökkenteni, illetve növelni.

Hajtómű fordulatszám

A szabályzó kimenetének értéke, mely alapesetben 0-1000 közötti tartományban lehet, de a határértékek módosítása esetén ez a tartomány csökkenhet.

M0, M1 értékek

Az *M0* és az *M1* paraméterek rendre megfelelnek a „Magasságtartás” fejezetben megtalálható összefüggés (6) *M0* és *M1* paramétereinek. A paraméterek megváltoztatásával a hajtómű-teljesítmény szabályzó körének jellemzőit lehet változtatni.

MK0, MK1 értékek

Az *MK0* paraméter szolgál a magasságmérő szenzor kalibrációjára. Mivel az üzemi tartományban a magasságmérő szenzor karakterisztikája lineáris, az *MK0* faktor gyakorlatilag annak meredekségét változtatja.

Lehetőség van kezdeti magasság beállítására is. Ez akkor lehet szükséges, ha a starthely völgyben vagy dombon van, de maga a repülés ettől eltérő átlagos terepmagasság felett történik. Ez esetben az *MK1* paraméter segítségével a magasságértékhez hozzáadhatunk (negatív érték esetében levonhatunk) egy eltolást.

A „D” nyomógomb egyszeri megnyomásával a sebességszabályzó képernyőjére kapcsolható a rendszer.

Aktuális sebesség

Az adatot beállítástól függően a GPS vagy a fedélzeti elektronika sebességmérő szenzora szolgáltatja. A sebesség km/h dimenzióban jelenik meg. GPS adat esetében kalibrációra nincs szükség. Ebben az esetben a sebesség értéke a repülőgép földhöz viszonyított sebessége lesz. A beépített szenzor használata esetében a megfelelő működés érdekében kalibrációra van szükség. A mérés elve légnyomásváltozáson alapul. A nyomás a gép szárnyán elhelyezett nyomásadóból (pitot cső) kerül a nyomásszenzorra. A nyomás értéke a gép sebességétől függően, az üzemi tartományon belül közel lineáris. A beépített szenzor a gép relatív (a környezeti levegőhöz viszonyított) sebességét méri!

Célssebesség

A célssebesség értéke km/h-ban értendő. Az itt beállított sebességgel fog a repülőgép repülni, pontosabban a sebességtartás szabályzó köre ezen az értéken igyekszik tartani a gép aktuális sebességét. A beavatkozás a magassági kormány változtatásán keresztül történik. A célssebesség értékét az „E” és az „F” nyomógombokkal lehet csökkenteni, illetve növelni.

S0, S1 értékek

Az *S0* és az *S1* paraméterek rendre megfelelnek a „Sebességtartás” fejezetben megtalálható összefüggés (7) *S0* és *S1* paramétereinek. A paraméterek megváltoztatásával a magassági kormány szabályzóköreinek jellemzőit lehet változtatni.

MK0 érték

Az *MK0* paraméter szolgál a sebességmérő szenzor kalibrációjára. Mivel az üzemi tartományban a sebességmérő szenzor karakterisztikája lineáris, az *MK0* faktor gyakorlatilag annak meredekségét változtatja.

A „D” nyomógomb egyszeri megnyomásával az adatforrások beállítását szolgáló első képernyőre kapcsolható a rendszer.

GPS választás

Mivel az egyes GPS-ek által szolgáltatott adatok szerkezete eltérő, a rendszerhez csatlakoztatni kívánt GPS típusát be kell állítani. A „C” nyomógomb segítségével három (Jupiter, Lowrance, Garmin) GPS közül lehet választani.

A „Jupiter” készülék csupán egy GPS modul, mely nem rendelkezik navigációs számítógéppel. Ebben az esetben a robotrendszer útvonaltartásra nem alkalmazható.

A „Lowrance” készülékek közül a „Globalnav 12” típusal történtek mérések. Ez a készülék tartalmaz komplett navigációs egységet, így a robotrendszer teljes mértékben kihasználható.

A „Garmin” készülékek közül a „Summit” és a „Vista” típusok kerültek tesztelésre. Mindkét típus esetében a robotrendszer teljes mértékben kihasználható.

Sebességmérés módja

Az „E” nyomógomb segítségével kiválasztható, hogy a sebességmérés a GPS sebességadata alapján, vagy a fedélzeti sebességmérő szenzor alapján történjen.

A „D” nyomógomb egyszeri megnyomásával az adatforrások beállítását szolgáló második képernyőre kapcsolható a rendszer.

Magasságmérés módja

A „C” nyomógomb segítségével kiválasztható, hogy a magasságmérés a GPS magassághoz alapján, vagy a fedélzeti magasságmérő szenzor alapján történjen.

Íránymérés módja

Az „E” nyomógomb segítségével kiválasztható, hogy az iránymérés (aktuális irány) a GPS mozgása alapján képzett adat alapján, vagy a GPS-be épített mágneses iránytű adata alapján történjen. Ez az opció csak a „Garmin” készülékek esetében érhető el.

A „D” nyomógomb egyszeri megnyomásával a szervomotorok mozgástartományának beállítását szolgáló képernyőre kapcsolható a rendszer.

Kormányok határértékei

A kormányok határértékeinek beállítása lehetővé teszi, hogy az adott repülőgép maximális kormánykitéréseit ki lehessen használni, ugyanakkor elkerülhető olyan vezérlőjel kiküldése, mely a fizikai határán túli pozícióba mozgatná a kormányokat, ami a szervomotorok tönkremeneteléhez vezetne.

M0, M1, M2 értékek

Az alapérték mindhárom esetben (három szabályzó kör három szervója) 1000, ami a motorok maximális kitérését biztosítja. Az értékek csökkentésével a munkatartomány alsó és felső értékei szimmetrikusan csökkennek.

A „D” nyomógomb egyszeri megnyomásával a robotrendszer paramétereinek mentésére nyílik lehetőség.

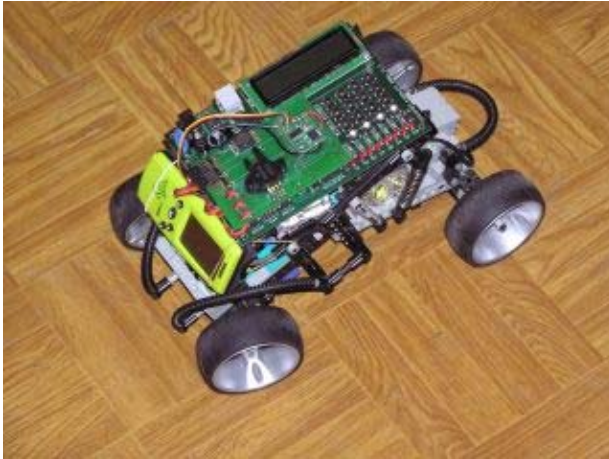
Mentés

A robotrendszer bármely paraméterének módosítása azonnal érvényes lesz. Kikapcsolás után azonban a program a régi beállítások értékeivel indul újra. Annak érdekében, hogy a kikapcsolással ne vesszenek el a beállítások, azokat rögzíteni kell a mikrokontroller tárolójában. Az „E” nyomógomb segítségével történik a beállítások mentése. A mentés során a program a teljes paraméterlistát rögzíti függetlenül attól, hogy az volt-e módosítva, vagy nem.

A „D” nyomógomb ismételt megnyomásával a rendszer visszakerül a fő képernyőre, melyen az aktuális irány és a céltól való eltérés látható.

A robotrendszer működése független az LCD panelen látható képernyőtől! Ez azt jelenti, hogy tetszőlegesen kiválasztott képernyő esetében is teljes értékű a rendszer összes funkciója!

4.7. Kísérleti robotautó

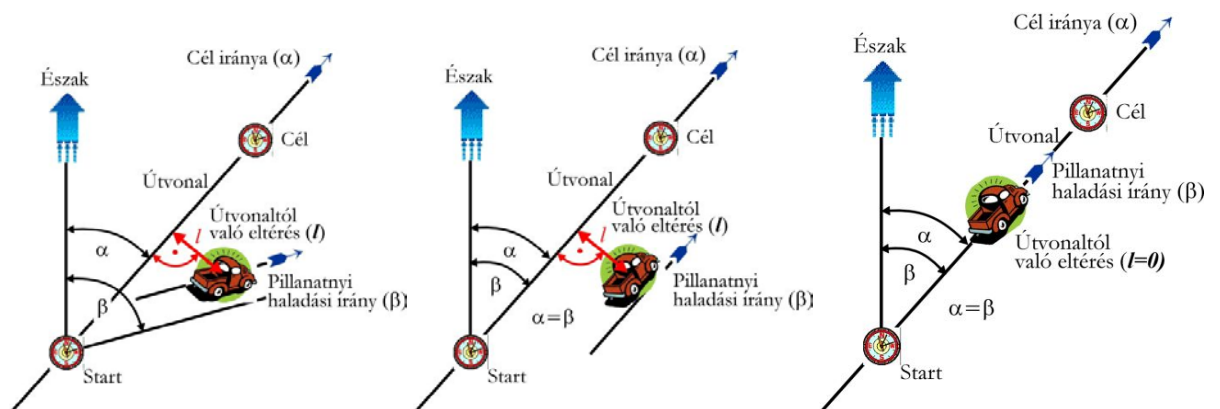


4.5. kép: Kísérleti, LEGO robotautó¹⁰⁰

Mivel a robotrendszer legösszetettebb része a navigáció, célszerűnek látszott ezt a modult egy olyan hordozón kipróbálni, ami tetszőlegesen lassan mozoghat, illetve bármikor megállítható. A tesztelést egy kisméretű autómódel segítségével végeztem (4.5. kép¹⁰⁰). **A kísérlet célja az volt, hogy a modul figyelmen kívül hagyva a robot repülés-stabilizáló képességét**

(magasság- és sebességtartás), a navigációs **modult, mint önálló egységet tesztelhessem** (4.6. ábra¹⁰¹).

Az elektromos hajtású modellautót elláttam egy szervóval, amely a kormányzást biztosította az első kerekek mozgatása által. Ezt a kormány szervet csatlakoztattam a robotrendszer navigációs kimenetéhez. A rendszer bemenő adatait egy „Geko 201” GPS biztosította. Ez a készülék megfelelő vételi körülmények mellett 3-5 méter pontossággal



4.6. ábra: A robotautó navigációjához felhasznált adatok és jellemző esetek¹⁰¹

¹⁰⁰ A kísérleti robotautót egy LEGO autó vázára szerelte fel Molnár András.

¹⁰¹ A navigációs kísérleteket elvégezte Molnár András.

képes meghatározni a saját pozícióját, valamint rendelkezik navigációs funkcióval.

A teszterület egy kisméretű, iskolai sportpálya volt, amit viszonylag magas (3 emelet) épületek vettek körül. A kedvezőtlen feltételek miatt a GPS csak a pálya középső területén biztosította a kb. 5-7 méter pontosságú helymeghatározást. Mivel azonban a relatív pontosság ettől kedvezőbb (akár 1-2 méter is lehet), a kísérlet végrehajtása lehetséges volt.

Közvetlenül a rendszer tesztelése előtt **beprogramoztam a GPS készülékbe 3 fordulópontot**, ezután **beállítottam a készüléket navigációs üzemmódba**. **Elvégeztem a robotegység beállításait, majd egy véletlenszerűen kiválasztott ponton elindítottam a járművet.**

A várakozásoknak megfelelően **a robotautó az első fordulópont irányába indult el**. A kísérletet többször megismételtem úgy, hogy mindig más pozícióból indítottam a járművet. Ezek során a jármű minden esetben az első fordulópont irányába kezdett el haladni.

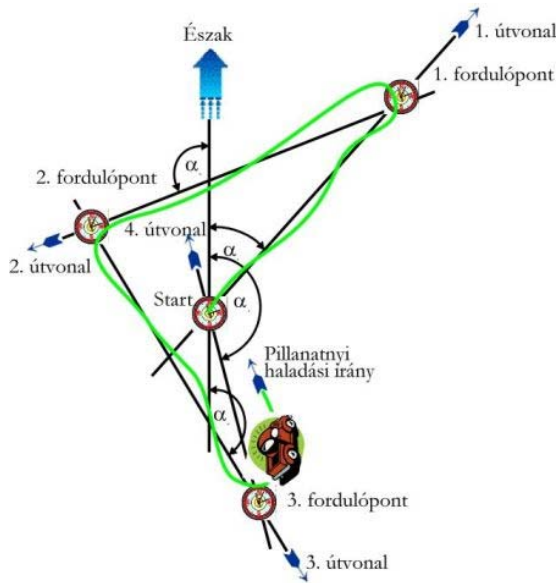
Kísérleteket végeztem a robotegység egyes paramétereinek hatását illetően. A szabályzó hurokerősítésének módosítása a szimuláció által előre jelzett viselkedést mutatta.

A viszonylag gyors és egyszerű beállítás igazolta, hogy készíthető olyan szabályzórendszer, amely mélyebb szabályzástechnikai ismeret nélkül is kezelhető.

A gyors kezdeti behangolást követően **összetett teszteket végeztem**. A vizsgálatok célja az volt, hogy a későbbi repülési feladatokat közelítő navigációs képességet tanulmányozzam.

Az első feladat egy 3 fordulópontból álló útvonal követése volt (start, fordulópontok, cél). **A cél az volt, hogy megállapítsam azokat a peremfeltételeket, amelyek mellett még működőképes marad a rendszer**. A szabályzó hurokerősítésének növelésével **megkerestem a rendszer gerjedésének határát**. **A GPS vevő pontosságát árnyékolással csökkentettem.**

A kísérletek során többször tapasztaltam, hogy az autó eltér a kijelölt cél irányától, és csak egy 360°-os forduló után követi újra. Ennek okát a viszonylag kisméretű teszterülettel, valamint a gyenge vételből adódó GPS „pontatlansággal” magyaráztam. A feltevésemet igazolja, hogy a 360°-os fordulók minden esetben a célponthoz közel kezdődtek, és sugaruk általában 1 méter volt, és a tesztelési időszakban a GPS abszolút pontossága 6 méter volt (GDOP értékek alapján számítva). A hurokerősítés értékének csökkentésével a rendszer kisebb kormánykitérésekkel reagált az útvonaltól való eltérésekre. A lerontott GPS pontosságot úgy tudtam kompenzálni, hogy a cél elérésének

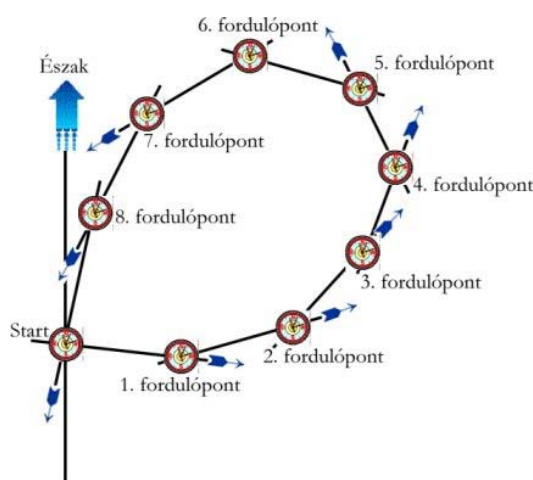


4.7. ábra: Egy tesztpálya 3 fordulóponttal¹⁰²

mondható.

Figyelembe véve azt, hogy a robotot később repülőgépeken kívánom alkalmazni, a pontosság több mint kielégítő.

Amennyiben a robotnak nem kimondottan fordulópontokat kell elérnie, hanem egy meghatározott alakú útvonalat kell lekövetnie, a fenti módszer alapján annyi fordulópontot kell letárolni, amennyi kellő pontossággal meghatározza a kívánt útvonal alakját (4.8.



4.8. ábra: 8 fordulóponttal meghatározott útvonal¹⁰³

A fentiek alapján sikerült egy univerzális, széles körben alkalmazható robotegységet kifejlesztem, mely átalakítás nélkül alkalmazható szárazföldi, vízi és légi járművekhez. A felhasználás feltétele minden esetben megfelelő GPS lefedettség.

¹⁰² A navigációs kísérleteket elvégezte Molnár András.

¹⁰³ A navigációs kísérleteket elvégezte Molnár András.

pontosságát is csökkentettem, így **a jármű a fordulópontot 1 méterre megközelítve átváltott a következő pont megközelítésére.**

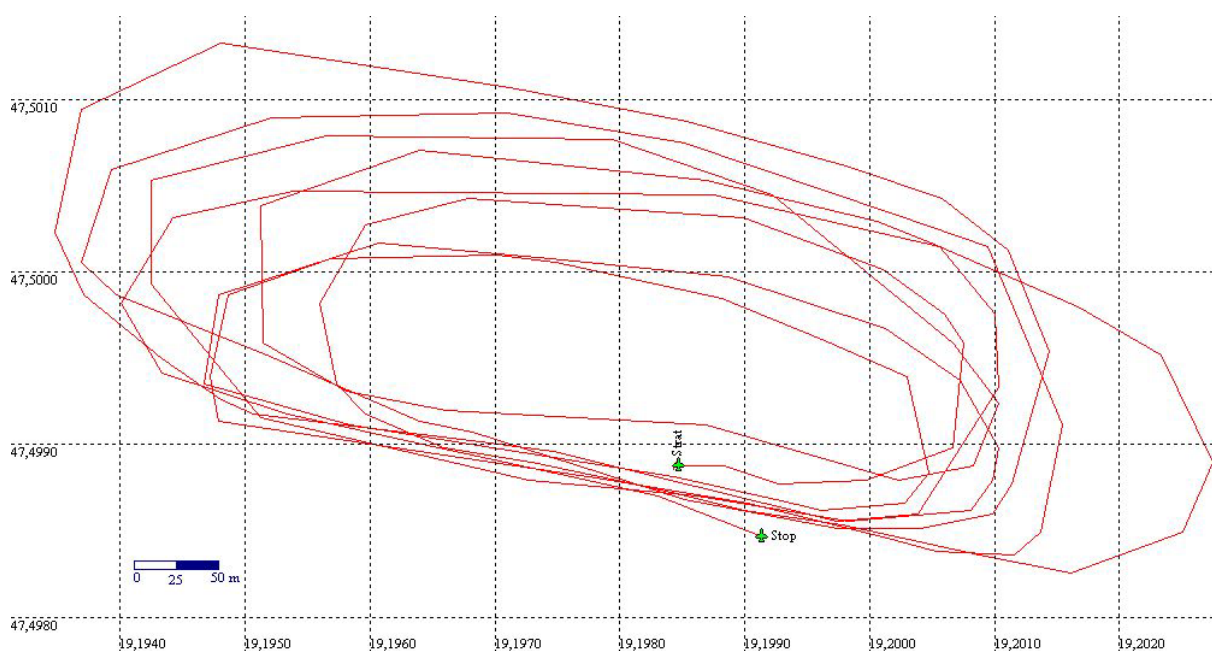
A 4.7. ábra¹⁰², a többször végrehajtott beállításokat követően, egy tesztútvonalat szemléltet. A zöld nyomvonal a robot valóságos útját mutatja. Látható, hogy a robot a kijelölt útvonalat többször keresztezve csak közelíti, de nem pontosan követi. Legnagyobb eltéréseket a fordulópontok közelében lehet tapasztalni. Mivel az egyes fordulópontok között rendre 7, 8, 8, 5 méter távolság volt, az eredmény kiválónak

ábra¹⁰³). A fordulópontok gyakoriságának a GPS készülék pontossága szab határt, mivel sűrűbben elhelyezni fordulópontokat, mint a meghatározás pontossága, értelmetlen. A fordulópontok maximális számát a GPS készülék memóriája korlátozza. Az alkalmazott GPS-szel 128 fordulópont tárolható el.

Az autóval végzett kísérletek kedvező tapasztalatai alapján egyértelmű, hogy az általam kifejlesztett robotrendszer vízi járművek autonóm vezérlésére is alkalmas.

4.8. Tesztrepülések

A szimulációs elemzéseket követően elkészített és felprogramozott robotpilóta egység beállítása érdekében tesztrepüléseket végeztem. A repülések feladata az volt, hogy a fedélzetre szerelt GPS segítségével olyan adatokhoz jussak, melyek a robotpilóta egység szabályzóköreinek beállításához elengedhetetlenek. Az általam alkalmazott GARMIN Etrex Vista készülék képes a pillanatnyi koordináták, a pillanatnyi magasság, valamint a pillanatnyi sebesség rögzítésére. Ezekből az adatokból rekonstruálni lehet a tesztrepülést, és a repülőgép tulajdonságaira vonatkozó következtetéseket lehet levonni.



4.3. diagram: A repülés nyomvonala¹⁰⁴

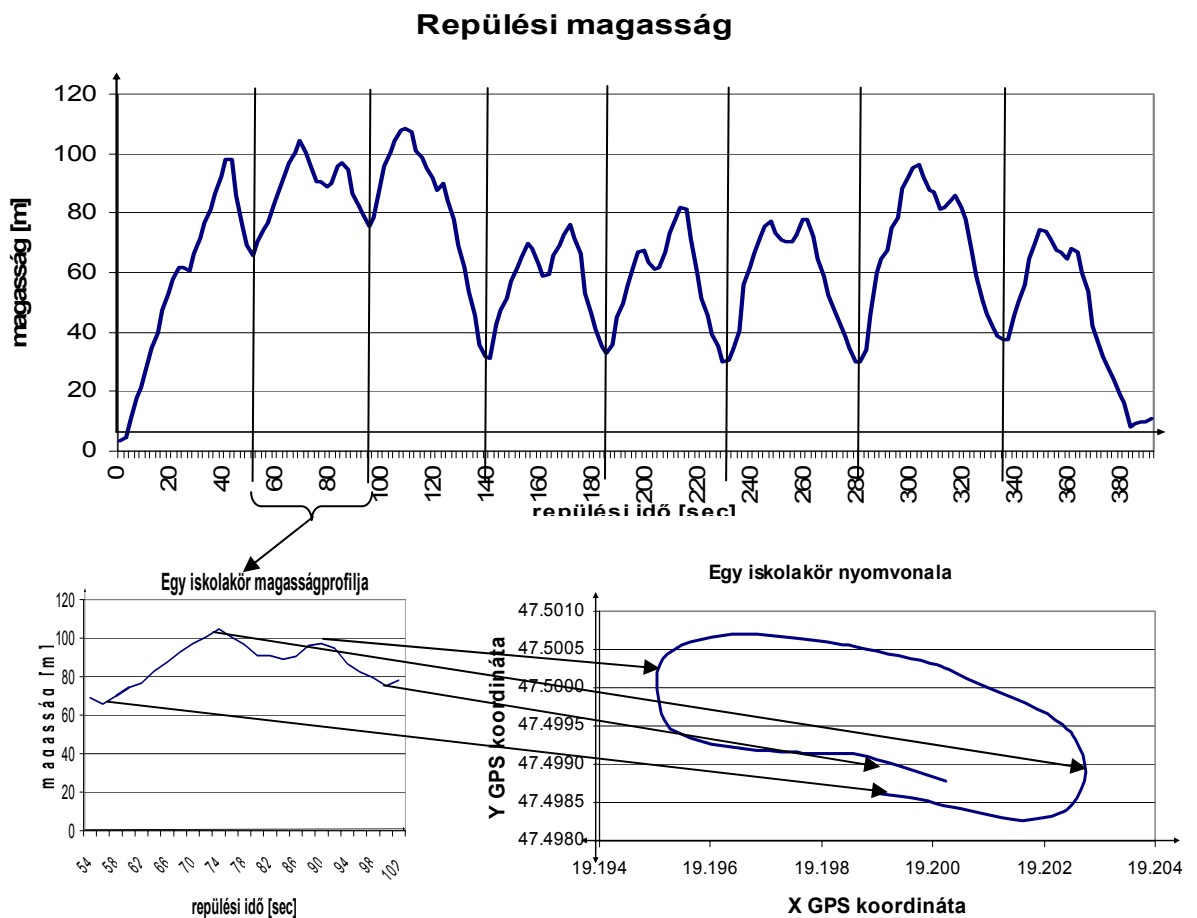
A 4.3. diagram¹⁰⁴ a repülés nyomvonalát szemlélteti a GPS által készített hosszúsági és szélességi fok koordinátarendszerében. Az ábráról leolvasható, hogy **a gép által repült „iskolakörök” legnagyobb hosszúsága 720 méter, legnagyobb szélessége pedig, 250 méter.** A 4.3. diagram adatait sík területen, távirányított repülés során rögzítette a GPS. A repülési feladat meghatározása során a pilótának a saját megítélése alapján úgy kellett megválasztania a repülőgép távolságát, hogy az a lehető legnagyobb legyen, de a biztonságos vezetést még ne befolyásolja. Megállapítható, hogy hagyományos távirányítás esetén a kezelőtől (pilóta) a gép körülbelül 350 méter távolságba vezethető biztonságosan.

¹⁰⁴ A mérést végezte és kiértékelte Molnár András.

Természetesen ez a távolság gyakorlattól és egyéni képességektől függően változhat. A maximális repülési távolság azonban gyakorlati szempontból akkor is kevés, ha az a mérésekből meghatározott 350 méter kétszerese. Noha ismertek olyan módszerek, melyek segítségével a repülőgép hatótávolsága tovább növelhető (távcsöves követés), azok hatékonysága és megbízhatósága igen kedvezőtlen. **A repülés során a tesztrepülő utazósebessége 120 km/h, a minimális sebessége 60 km/h, a csúcs sebessége pedig, 140 km/h volt.**

Az útvonal pontossága tekintetében megállapítható, hogy a kezelő viszonylag pontosan csak a rajta keresztül vezető síkon tudja vezetni a gépet. A 4.3. diagramon jól látható, hogy a távolság megítélése meglehetősen pontatlan, noha a repülési feladat azonos pálya mentén végrehajtott iskolaköröket írt elő.

Az adatok további elemzése során a repülési magasságot vizsgáltam. A magasság megítélése tekintetében a távolság megítéléséhez hasonló megállapításra jutottam. A 4.4. diagram a repülés során mért magasságértékeket ábrázolja.



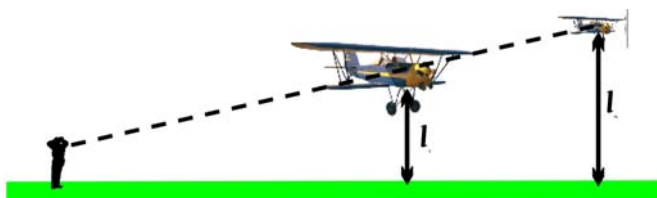
4.4. diagram: A repülés magasságprofilja¹⁰⁵

¹⁰⁵ A mérést végezte és kiértékelte Molnár András.

A 4.4. diagram felső grafikonja a teljes repülési idő alatt mért magassáértékeket szemlélteti, míg az alsó, bal oldali grafikon egy iskolakör alatt mért magasságot ábrázolja. A jobb érthetőség érdekében a diagram jobb alsó területén látható az a repülési nyomvonal, amely során rögzítésre kerültek a kinagyított magassá adatok.

A repülési feladat úgy lett meghatározva, hogy a pilóta a repülőtér felett alacsony „áthúzásokkal”, az úgynevezett hosszú falon (az alacsony áthúzásokkal párhuzamos szakaszon) pedig azonos magasságban vezette a gépet. Ennek megfelelően a két rövid fal emelkedő, illetve süllyedő szakaszokból épül fel.

A magassági diagram elemzése során megfigyelhető, hogy a hosszú falon történő repülés során, kivétel nélkül változó volt a magasság annak ellenére, hogy azon a szakaszon a gépet azonos magasságon kellett tartani. Mivel a magasságváltozás jellege is minden esetben azonos, a véletlent, illetve a vezetési hibát ki lehet zárni. Érdekes még megjegyezni, hogy a repülés során a pilóta és a gépet megfigyelők a hosszú falon történő repüléseket egyaránt állandó magasságú, vízszintesen végrehajtott repülésnek látták. A jelenség magyarázatául a paralaxis hiba szolgál. A pilóta szemszögéből a távolabb repülő gép akkor van azonos magasságban a hozzá közel repülővel, ha az magasabban van (4.6. kép). A mérési adatok alapján látható, hogy a legmagasabb repülési pontok a pilótától legmesszebb lettek rögzítve, míg az adott nyomvonalon a legalacsonyabb repülés a pilótához legközelebbi szakaszon volt.



4.6. kép: Paralaxis hiba a magasság megítélésében

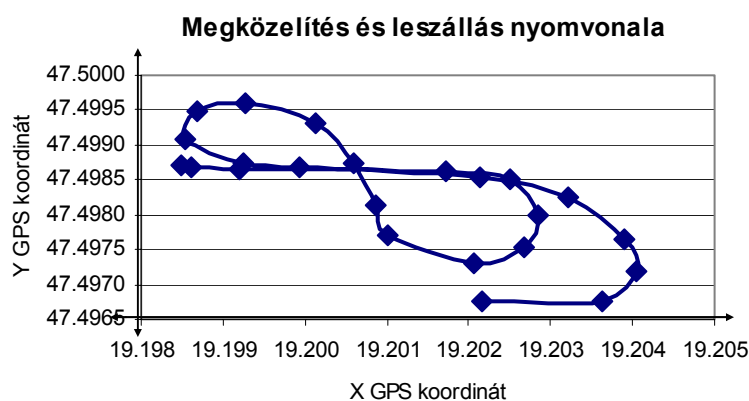
A távolság- és magasságbecslés hibái alapján belátható, hogy szabad szemmel történő irányítás során a pilótától távoli precíziós feladatok végrehajtása nem lehetséges.

4.8.1. Leszállás

A feladat pontos végrehajtása igen lényeges, mivel a repülési pálya a föld érintésével ér véget! A leszállási műveletet úgy kell végrehajtani, hogy a gép a földet érés pillanatában a lehető legkisebb sebességgel repüljön, ugyanakkor az azt megelőző szakaszban biztonságosan manőverezhető legyen. Ez utóbbi kritérium úgynevezett sebességtartalékot jelent, amit a földet érés előtt kilebegtetéssel (a talaj felett néhány centiméter magasságban végrehajtott vízszintes repülés) kell „elfogyasztani”.

A leszállás folyamata már a behelyezkedéssel kezdetét veszi. Noha a teljes iskolakör végrehajtása kezdőknél mindenképpen előnyös, általában elegendő a rövidfalat és az utolsó fordulót a leszállási manőverbe beépíteni. A megfelelő távolságban és magasságban végrehajtott fordulóval a repülőgép a leszállóhely irányába áll, és a siklopályája a leszállómező első harmadánál ér véget. A siklopálya meredekségét a repülőgép aerodinamikai tulajdonságai határozzák meg. Kisebb-nagyobb mértékben minden repülőre igaz az, hogy a siklopályán sebességük megnő. A leszállás ezen fázisában a sebességnövekedés kedvezőtlen, ezért a hajtómű teljesítményének csökkentése mellett egyes típusokon a szárnyakon található fékszárnyak kibocsátásával lehet a sebességnövekedés mértékét csökkenteni vagy akár megszüntetni. Fékszárnyakkal nem rendelkező repülők esetében (a modellrepülők többsége ilyen) a sebesség növekedését úgynevezett „csúsztatással” is lehet csökkenteni. Ilyenkor a repülés irányából az oldalkormány segítségével a törzset jobbra vagy balra kitérítjük. Az oldalkormány „belépésével” egyidejűleg a gép elbillen, amit megfelelő csűrőkormányval kell kompenzálni. Ilyenkor a repülőgép „oldalazva” repül és a megnövekedett felület (törzs repülés irányára merőleges vetülete) jelentős fékezőhatást eredményez. Mivel a csúsztatás számos kedvezőtlen mellékhatással jár (aszimmetrikus megfűvés a szárnyakon, a törzs által keltett turbulens áramlás csak az egyik szárnyat éri, jelentős magasságvesztés stb), valamint összehangolt csűrő-magassági kormánykezelést igényel, csak gyakorlott pilóták esetében alkalmazható.

A tesztrepülések során méréseket végeztem a leszállási manőverkor szükséges



4.5. diagram: A megközelítés és a leszállás nyomvonala¹⁰⁶

repülési paraméterek megállapítása céljából. A kísérletek során azt vizsgáltam, hogy a távirányítással vezetett gép sebessége és magassága miként változik a leszállás végrehajtása folyamán. A 4.5. diagram¹⁰⁶ egy leszállás nyomvonalát szemlélteti. A leszállás során az első megközelítés átstartolással

¹⁰⁶ A mérést végezte és kiértékelte Molnár András.

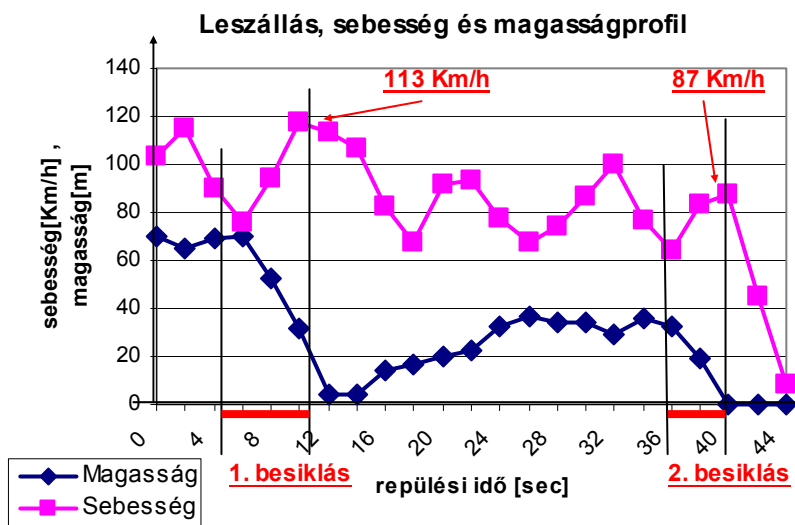
(mielőtt földet ért volna a gép megszakítottam a leszállást) ért véget, míg a második megközelítés sikeres földetéréssel fejeződött be. Az átstartolás oka a túlzottan nagy megközelítési sebesség volt.

A GPS által rögzített adatok elemzése során jól látható (4.6. diagram¹⁰⁷), hogy a sikertelen megközelítés oka a helytelen magasságban elkezdett leszállás volt.

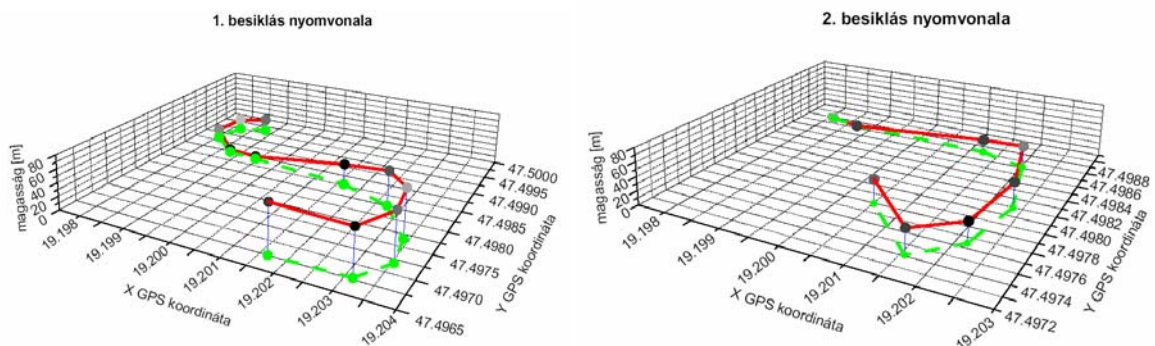
A 4.6. diagramon látható első besiklás során a repülőgép sebessége 76 km/h-ról 113 km/h-ra növekedett, miközben 70 méteres magassága 0 méterre csökkent. A kifutópálya hossza nem tette lehetővé, hogy a 113 km/h sebességet kilebegtetéssel „elkoptassa” a modell,

ezért a leszállást meg kellett szakítani.

A második besiklás során a gép sebessége 64 km/h-ról 87 km/h-ra növekedett, miközben magassága 32 méterről 0 méterre csökkent. Bár a 87 km/h az adott modell esetében még mindig magas, a kifutópálya hossza lehetővé tette a leszállást.



4.6. diagram: A magasság és a sebesség változása a leszállás utolsó fázisában¹⁰⁸



4.7. diagram: A leszállás háromdimenziós diagramja¹⁰⁸, a nyomvonal pontjai a sebességgel arányos színűek

A 4.7. diagram bal oldala az 1. besiklás háromdimenziós nyomvonalát szemlélteti.

¹⁰⁷ A mérést végezte és kiértékelte Molnár András.

¹⁰⁸ A mérést végezte és az „Origin Lab” program segítségével kiértékelte Molnár András.

4.8.2. A magasságtartás beállítása



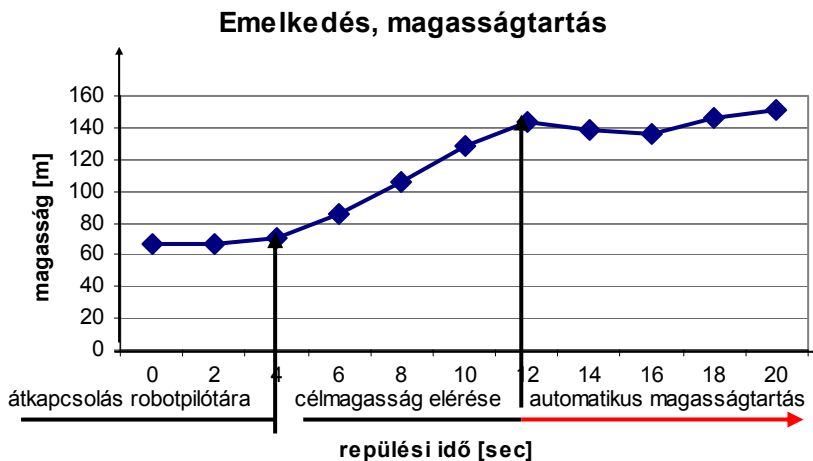
4.7. kép: TIRMO, a kísérleti robotrepülő¹⁰⁹

A robotrendszer további tesztelése egy kisméretű modellrepülőn történt (4.7. kép¹⁰⁹). A robotrendszer felépítéséből adódóan a három fő modul tesztelése egyenként történt. Mivel a navigáció előzetes tesztelése a LEGO roboton már megtörtént, a modul elvi működése igazoltnak tekinthető.

Az első repülések alkalmával a magasságtartás vizsgálatára került sor.

A modell hagyományos távirányítással emelkedett a magasba, és a pilóta biztonságos magasságban átkapcsolt robotvezérlésre. Ez az állapot biztonsági okokból nem a teljes robotvezérlést jelentette. Az automatika csupán a magasságtartáshoz tartozó motorfordulat (gáz) szabályozást kezelte, tehát a kormányzás teljes mértékben a pilóta irányítása alatt maradt. A modell néhány finomhangolást (a szabályzó paramétereinek módosítása) követően megfelelően működött (4.8. diagram¹¹⁰)! Az előre beállított magasság felett a

szabályzó fokozatosan csökkentette a motor fordulatszámát, míg a célmagasság alatt növelte azt.



4.8. diagram: Automatikus magasságvizsgálás¹¹⁰

¹⁰⁹ A repülőgépet átalakította és üzemeltette Molnár András.

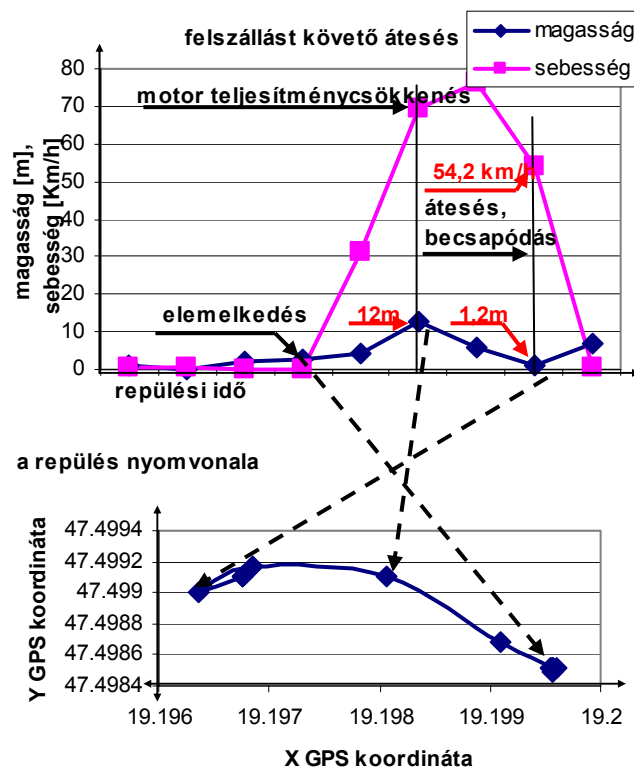
¹¹⁰ A mérést végezte és kiértékelte Molnár András.

4.8.3. A sebességtartás beállítása

A tesztelés következő fázisa a sebességtartás volt. Ekkor már a magassági kormány és a motorfordulat szabályozása is az elektronikára lett bízva. A tesztpilóta irányítása alatt csak az úgynevezett csűrőkormányok maradtak, mellyel a modell fordulni képes. Ennek a funkciónak a beállítása több időt vett igénybe, mivel a két szabályozó (magasság, sebesség) hat egymásra. Több napos repülések és azok adatainak értékelését követően, sikerült a modellt állandó magasságon tartani úgy, hogy közben a pilóta fordulót is végzett. Ekkor a rendszer, a motor és a magassági kormány összehangolt működtetésével kisebb, csillapodó lengések után, megtartotta az előre beprogramozott magasságot.

A navigáció repülés alatti tesztelésére sajnos a modell sérülése miatt eddig nem került sor.

4.8.4. A robotegység, mint „fekete doboz”



4.9. diagram: A felszállást követő átesés magasság- és sebességadatai, valamint nyomvonala¹¹¹

Mint az az eddigi fejezetekből is látszik, a fedélzeti robotpilóta egység folyamatosan rögzíti a repülés néhány, fontos adatát. Ezek az adatok leszállás után letölthetők és utólag tetszés szerint elemezhetők.

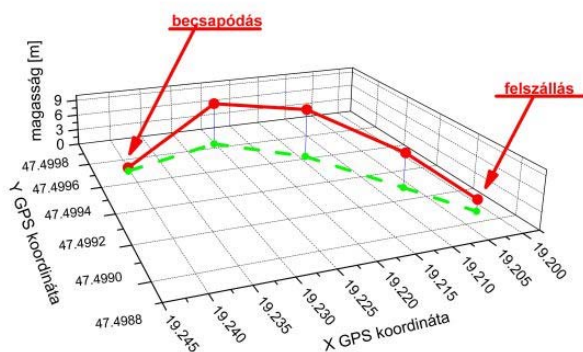
A repülési adatok elemzése jelentős segítség a robotrendszer beállítása során, de segítség egy-egy repülési feladat utólagos értékelése esetén is. A 4.9. diagram¹¹¹ egy töréssel végződő átesés utolsó másodperceinek eseményét ábrázolja.

A diagramon jól látható, hogy kezdetben az emelkedés

¹¹¹ A mérést végezte és kiértékelte Molnár András.

megfelelő mértékű. A sebesség egyenletesen emelkedett 70 km/h értékig, miközben a gép elérte a 12 méteres magasságot. Ezen a ponton az emelkedés merüléssé változott, miközben a sebesség a várttól eltérően nem növekedett, hanem csökkent. Ennek oka a lecsökkent motorteljesítmény volt. A gép sebessége lecsökkent a kritikus 55 km/h alá, és bekövetkezett az átesés. Mivel ez a pillanat 1 méter magasságban történt, a gép azonnal a

földre csapódott. A 4.10. diagram¹¹² az esemény adatainak 3 dimenziós rekonstrukcióját szemlélteti.



4.10. diagram: Az átesés adatainak 3 dimenziós feldolgozása¹¹²

feltárhatóak és a jövőre nézve megelőzhetővé válnak a rendszerben megjelenő rejtett hibák.

A repülési adatok utólagos elemzése oktatási szempontból is hasznos. Elemezhetőek különféle repülési helyzetek, melyek megoldására így előre fel lehet készülni.

¹¹² A mérést végezte és az „Origin Lab” programmal kiértékelte Molnár András.

Következtetések

Kísérleteim során sikerült több sikeres repülést és adatgyűjtést végrehajtanom, melyek során az alábbi tapasztalatokat szereztem:

- **A GPS készülékek gyakorlati pontosságának meghatározása igazolta azt a feltevésemet, hogy a rendszer alkalmas a robotrepülőgépek fedélzeti szabályzóegységének repülési adatokkal történő ellátására.**
- A szimulációk és a tesztrepülések egyaránt igazolták, hogy **az általam meghatározott harmadfokú szabályzófüggvények alkalmasak robotpilóta rendszerekben történő felhasználásra.**
- A különféle mobiljárműveken végzett kísérleteimmel igazoltam, hogy **az általam kifejlesztett robotvezérlő egység univerzálisan alkalmazható** légi és szárazföldi, autonóm robotjárművekben.
- **A robotrendszer fejlesztése során a rendelkezésemre álló eszközök képességeit maximálisan kiaknáztam**, így a program fejlesztésére szánt időben „csak” azokat a modulokat kellett elkészítenem, melyek legszorosabban fedték le kutatói, fejlesztői munkámat. Ennek megfelelően **felhasználtam, hogy a GPS készülékek jelentős részében létezik navigációs modul.** Kerestem olyan GPS készüléket, mely rendelkezett barometrikus magasságmérővel és mágneses iránytűvel, így ezeket a mérőrendszereket nem kellett külön kifejlesztenem. **Kihasználtam a GPS készülékek adatrögzítő (logolási) képességét**, ami nagymértékben segítette a berepülés során szükséges beállítások elvégzését.

Új tudományos eredmények

Kutatómunkám során a célkitűzésekben megfogalmazottaknak sikerült eleget tennem.

Célkitűzéseimnek megfelelően megszereztem azokat az ismereteket, melyek elengedhetetlenül szükségesek a kisméretű repülőszervezetek tervezése szempontjából.

Rámutattam repüléstechnikai szempontból lényeges jellemzők (pl.: átesési hajlam, stabilitás, kormányozhatóság stb.) fizikai okaira, illetve befolyásolásuk lehetséges módozataira.

Kidolgoztam, és kutatásaim során alkalmaztam, egy olcsó és gyors gyártást biztosító repülőgép építési technológiát, mely segítségével, kedvező hatékonysággal tudtam a kísérleteimet elvégezni.

Elkészítettem egy repülőgépek autonóm vezérlését biztosító robotpilóta egységet, mely jellemzői összhangban vannak a kutatási célkitűzésben megfogalmazott szempontokkal.

Számos kísérlettel igazoltam, hogy robotrendszerem alkalmas légi és szárazföldi járművek autonóm vezérlésére.

Kutató és fejlesztő munkám során az alábbi eredményeimet tekintem új tudományos eredményeknek:

- **Megalkottam, és kísérletekkel igazoltam, egy olyan univerzális vezérlőegységet, amely egyaránt képes szárazföldi, vízi és légi robotjárművek autonóm irányítására. Az egység további előnye a moduláris felépítés, melyhez szabványos illesztő felületeken keresztül tetszőleges további kiegészítő rendszerek (légsebességmérő, magasságmérő, inerciális stabilizátorok gyorsulásmérők, gyroszkópok stb.) kapcsolhatók.**
- **Megalkottam, és kísérletekkel igazoltam, olyan harmadfokú szabályzófüggvényeket ((6), (7), (8)), melyek segítségével valósidejű vezérlések valósíthatók meg. Az általam meghatározott függvények előnye, hogy nem tartalmaznak függvényösszetételeket, értelmezési tartományuk folytonos, így a hagyományos megoldásokhoz képest nagyobb biztonsággal alkalmazhatók. Az**

általam alkalmazott harmadfokú szabályzófüggvények csökkentik a rendszer rejtett hibáinak valószínűségét, ezáltal biztonságosabb, megbízhatóbb szabályzók alkothatók meg.

- **Kidolgoztam olyan „gyors prototípus” építési technológiát, mellyel az ismert eljárásokhoz képest hatékonyabban lehet kísérleti robotrepülőtesteket építeni, illetve módosítani. Az általam javasolt építési technológia költség-hatékony és előnyösen alkalmazható minden olyan fejlesztés során, ahol több kísérleti minta összehasonlító vizsgálatát kell elvégezni.**
- **Meghatároztam, és kísérletekkel igazoltam, azokat az elveket, amelyek alkalmazásával jelentősen csökkenthetőek a meghibásodott robotrepülőgépek által okozott anyagi és személyi károk.**

Összefoglalás

Kutatásaim során elért eredményeim igazolták, hogy kutatási hipotéziseim helytállóak és aktuálisak voltak. Mind szakmai fórumokon, mind pedig, potenciális felhasználókkal történt eszmecsere folyamán világosan kiderült, hogy a kisméretű robotrepülőgépeknek gyakorlati hasznosítási lehetőségeik vannak. Demonstrációs céllal végzett tűzoltási, illetve tűz terjedési megfigyeléseket végeztem tűzoltók szakmai irányítása alatt. A kísérletek tapasztalatait mind a kísérleteket felügyelő parancsnokság, mind pedig, további szakmai fórumok is sikeresnek és perspektivikusnak ítélték meg.

A fentiek értelmében kutatási munkámat eredményesnek ítélem meg.

Javaslatok, ajánlások

Munkám során megfogalmazódtak kutatási területemet érintő, de idő- és terjedelmi korlát miatt abban nem szereplő lehetőségek, megoldási javaslatok.

1. **Javaslom egy hazai kutató-fejlesztő központ létrehozását**, melynek feladata kisméretű robotrepülőgépek kifejlesztése. A fejlesztés irányelveit a potenciális felhasználók, mint például a Magyar Honvédség, a Tűzoltóság, a Katasztrófavédelem és egyéb számos, stratégiaileg fontos vállalat, mint például az Elektromos Művek, a vízügyi szervek stb., kell, hogy meghatározzák.
2. **Javaslom egy robotrepülő szolgáltató egység létrehozását**, melynek feladata az általa üzemeltetett robotrepülőgépekkel történő, megrendelői igényeket biztosító szolgáltatás. Ilyen **szolgáltatás lehet**, például árvízveszélyes időszakok esetén történő **védőgátak folyamatos légi megfigyelése**, nagykiterjedésű tüzesetek során a **tüzek terjedésének, oltásának légi megfigyelése** stb.
3. **Javaslom az értekezés „Kísérleti robotrepülőgép sárkányszerkezetének gazdaságos kialakítása” című fejezetének oktatási segédanyagként való alkalmazását**, különös tekintettel a majdani robotrepülő személyzetének kiképzése esetében.

Az értekezés ábráinak, diagramjainak, képeinek és táblázatainak jegyzéke

Ábrajegyzék

1. ábra **A robotrepülőgép általános felépítése**
Forrás: Az ábrát az [19, 6.] szakirodalmakban szereplő képek felhasználásával készítette Molnár András
2. ábra **A kutatási tevékenységem főbb területei, kiemelve az új tudományos eredményeim területeit**
Forrás: Az ábrát készítette Molnár András
- 1.1. ábra **Az UAV-k tömeg és képesség szerinti csoportosítása**
Forrás: http://icat-server.mit.edu/Library/Download/2005_Weibel%20R%20-%20Sefety%20Considera.pdf (2005. január)
A magyarnyelvű feliratokat készítette Molnár András
- 1.2. ábra **Az „MP 2000” robotrendszer blokkvázlata**
Forrás: MP2000 kézikönyv
A magyarnyelvű feliratokat készítette Molnár András
- 1.3. ábra **Az „MP 2000” robotrendszer szabályzóköreinek blokkvázlata**
Forrás: MP2000 kézikönyv
A magyarnyelvű feliratokat készítette Molnár András
- 1.4. ábra **Többretegű térkép felépítésének vázlata**
Forrás: http://www.esri.com/mapmuseum/mapbook_gallery/volume18/defense3.html (2005. január)
- 1.5. ábra **Háromdimenziós kép előállítás**
Forrás: <http://www.esri.com/> (2002.december)
- 1.6. ábra **Magassági profil tervezése domborzatmodell segítségével**
Forrás: A programot fejlesztette, és a képet készítette Horváth Zoltán
- 2.1. ábra **Szárnyszelvény**
Forrás: Az ábrát készítette Molnár András
- 2.2. ábra **Az „E 168” szárnyszelvény polárisa és kontúrja**
Forrás: A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András
<http://www.nasg.com/afdb/list-airfoil-e.phtml> (2002)
- 2.3. ábra **A „Clark-Y” szárnyszelvény polárisa és kontúrja**
Forrás: A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András
<http://www.nasg.com/afdb/list-airfoil-e.phtml> (2002)
- 2.4. ábra **Az „E 211” szárnyszelvény polárisa és kontúrja**
Forrás: A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András
<http://www.nasg.com/afdb/list-airfoil-e.phtml> (2002)
- 2.5. ábra **Az „S 2060” szárnyszelvény polárisa és kontúrja**
Forrás: A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András
<http://www.nasg.com/afdb/list-airfoil-e.phtml> (2002)
- 2.6. ábra **A szárnyszelvény körül kialakuló turbulens réteg**
A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András
- 2.7. ábra **Turbóléc a szárnyon**
Forrás: Az ábrát készítette Molnár András

- 2.8. ábra **Elcsavarás mentes szárny**
Forrás: Az ábrát készítette Molnár András
- 2.9. ábra **Mechanikai elcsavarású szárny**
Forrás: Az ábrát készítette Molnár András
- 2.10. ábra **Aerodinamikai elcsavarású szárny**
Forrás: Az ábrát készítette Molnár András
- 2.11. ábra **Az ívelés hatása a szárny állásszögére**
Forrás: Az ábrát készítette Molnár András
- 2.12. ábra **Erők stabil repülési helyzetben**
Forrás: Az ábrát készítette Molnár András
- 2.13. ábra **Erők oldalra dőlt repülési helyzetben felsőszárnyas konstrukció esetén**
Forrás: Az ábrát készítette Molnár András
- 2.14. ábra **Erők oldalra dőlt repülési helyzetben alsószárnyas konstrukció esetén**
Forrás: Az ábrát készítette Molnár András
- 2.15. ábra **Erők a keresztengely körüli elfordulás során zavarmentes repülésnél**
Forrás: Az ábrát készítette Molnár András
- 2.16. ábra **Erők a keresztengely körüli elfordulás során zavar hatására**
Forrás: Az ábrát készítette Molnár András
- 2.17. ábra **A „V” törésű szárnyon keletkező felhajtóerő**
Forrás: Az ábrát készítette Molnár András
- 2.18. ábra **A „V” törésű szárnyon stabilizáló hatása**
Forrás: Az ábrát készítette Molnár András
- 2.19. ábra **A „V” törés állásszög változtató hatása**
Forrás: Az ábrát készítette Molnár András
- 2.20. ábra **A „fülezett” szárny hatása**
Forrás: Az ábrát készítette Molnár András
- 3.1. ábra **A GPS holdak kedvező konstellációja**
Forrás: <http://www.cmtinc.com/gpsbook/index.htm#chap> (2005. január) Magyar feliratokat készítette Molnár András
- 3.2. ábra **A GPS holdak kedvezőtlen konstellációja**
Forrás: <http://www.cmtinc.com/gpsbook/index.htm#chap> (2005. január) Magyar feliratokat készítette Molnár András
- 3.3. ábra **GPS készülékek pontosságát meghatározó program**
A programot készítette Molnár András
- 4.1. ábra **Az „AEROBOT” robotpilóta egység blokkvázlata**
A robotegység rendszertervét készítette Molnár András
- 4.2. ábra **Az „AEROBOT” robotpilóta szabályzóköreinek átviteli függvény értelmezése**
A robotegység rendszertervét készítette Molnár András
- 4.3. ábra **Az „AEROBOT” robotpilóta navigációjának elve**
A robotegységet készítette Molnár András
- 4.4. ábra **Az „AEROBOT” robotpilóta fő programjának folyamatábrája**
A robotegységet készítette Molnár András
- 4.5. ábra **Az „AEROBOT” robotpilóta egység és programjának állapotdiagramja**
A robotegység programját készítette Molnár András
- 4.6. ábra **A kísérleti robotautó navigációjához felhasznált adatok és jellemző esetek**
A navigációs kísérleteket elvégezte Molnár András
- 4.7. ábra **A kísérleti robotautó egy tesztpályája 4 fordulóponttal**
A navigációs kísérleteket elvégezte Molnár András
- 4.8. ábra **A kísérleti robotautó egy tesztpályája 9 fordulóponttal**
A navigációs kísérleteket elvégezte Molnár András

Diagramjegyzék

- 2.1. diagram **A szárnyszelvény körül kialakuló nyomáseloszlás**
Forrás: Az ábrát Jereb Gábor, *Vitorlázó repülőgépek*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977 nyomán készítette Molnár András
- 2.2. diagram **Az ismertetett szelvények összehasonlító diagramja**
A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András
- 2.3. diagram **Egy lamináris profil ellenállásának változása a Re szám függvényében**
A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András
- 2.4. diagram **Egy „vastag” profil ellenállásának változása a Re szám függvényében**
A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András
- 2.5. diagram **Egy „vékony” profil ellenállásának változása a Re szám függvényében**
A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András
- 2.6. diagram **A profil vastagságának hatása a kritikus állásszögre**
A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András
- 2.7. diagram **A szárnyszelvény nyomatéki tényezőjének változása**
A diagramot a Design Foil, szélcsatorna szimulátor program segítségével készítette Molnár András
- 2.8. diagram **A nyomásközéppont és a súlypont hatása a stabilitásra**
Forrás: Az ábrát Jereb Gábor, *Vitorlázó repülőgépek*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977 nyomán készítette Molnár András
- 2.9. diagram **A nyomásközéppont és a súlypont hatása a stabilitásra pozitív nyomatékú szelvény esetén**
Forrás: Az ábrát Jereb Gábor, *Vitorlázó repülőgépek*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977 nyomán készítette Molnár András
- 2.10. diagram: **A karakterisztikus egyenlet gyökeinek befolyása a sztatikus (a) és a dinamikus (b) stabilitásra,**
Forrás: Az ábrát a *Műszaki lexikon III. kötet*, főszerk. Polinszky Károly, Akadémia kiadó, Budapest 1974 nyomán készítette Molnár András
- 3.1. diagram **A GPS szándékos zavarásának (SA) megszűnésének hatása**
Forrás: <http://www.cmtinc.com/gpsbook/index.htm#chap> (2005. január) Magyar feliratokat készítette Molnár András
- 3.2. diagram **12 mérés során érzékelt műholdak száma a „NavStar” GPS vevő esetén**
A mérést végezte Molnár András
- 3.3. diagram **12 mérés során tapasztalt DOP értékek a „NavStar” GPS vevő esetén**
A mérést végezte Molnár András
- 3.4. diagram **A GPS és a barometrikus magasságmérés összehasonlítása**
A mérést végezte Molnár András
- 3.5. diagram **A GPS és a pitotcsöves sebességmérés összehasonlítása**
A mérést végezte Molnár András
- 3.6. diagram **A pitotcsöves sebességmérő meghibásodása**
A mérést végezte Molnár András
- 4.1. diagram **Az „AEROBOT” robotpilóta szabályzóköreinek lehetséges átviteli függvényei**
A függvények elemzését készítette Molnár András
- 4.2. diagram **Az „AEROBOT” robotpilóta harmadfokú átviteli függvényének karakterisztikája**
A függvények elemzését készítette Molnár András

- 4.3. diagram **Egy tesztrepülés GPS által rögzített nyomvonala**
A mérést végezte és kiértékelte Molnár András
- 4.4. diagram **Egy tesztrepülés magasságprofilja**
A mérést végezte és kiértékelte Molnár András
- 4.5. diagram **Egy megközelítés és leszállás GPS által rögzített nyomvonala**
A mérést végezte és kiértékelte Molnár András
- 4.6. diagram **Magasság és sebesség változása a leszállás utolsó fázisában**
A mérést végezte és kiértékelte Molnár András
- 4.7. diagram **Magasság és sebesség változása a leszállás utolsó fázisában (háromdimenziós diagram)**
A mérést végezte és kiértékelte az „Origin Lab” program segítségével Molnár András
- 4.8. diagram **Automatikus magasságkövetés**
A mérést végezte és kiértékelte Molnár András
- 4.9. diagram **Felszállást követő átesés magasság és sebességadatai. Valamint nyomvonala**
A mérést végezte és kiértékelte Molnár András
- 4.10. diagram **Felszállást követő átesés magasság és sebességadatai. Valamint nyomvonala (háromdimenziós diagram)**
A mérést végezte és kiértékelte az „Origin Lab” program segítségével Molnár András

Képjegyzék

- 1.1. kép **„Dragon Eye” kísérleti robotrepülőgép**
Forrás: <http://www.strikenet.js.mil/uavairshow/dragoneye.htm>
(2005. január)
- 1.2. kép **„Pointer” kísérleti robotrepülőgép**
Forrás: <http://www.aerovironment.com/area-aircraft/prod-serv/pointer.html> (2005. január)
- 1.3. kép **„Bidrone” kísérleti robotrepülőgép**
Forrás: <http://www.alcore-tech.com/default.htm> (2005. január)
- 1.4. kép **A „Meta VR inc” földi irányítóegysége**
Forrás: <http://www.metavr.com/casestudies/TUAV.html> (2005 január)
- 1.5. kép **A „Meta VR inc” földi irányítóegysége**
Forrás: <http://www.metavr.com/casestudies/TUAV.html> (2005 január)
- 1.6. kép **A „Meta VR inc” földi irányítóegységének pilóta munkahelye**
Forrás: <http://www.metavr.com/casestudies/TUAV.html> (2005 január)
- 1.7. kép **A „Meta VR inc” földi irányítóegységének navigációs munkahelye**
Forrás: <http://www.metavr.com/casestudies/TUAV.html> (2005 január)
- 1.8. kép **A „Meta VR inc” földi irányítóegységének elvi vázlata**
Forrás: <http://www.metavr.com/casestudies/TUAV.html> (2005 január)
A magyar nyelvű feliratokat készítette Molnár András
- 1.9. kép **A „Meta VR inc” földi irányítóegységének elvi vázlata**
Forrás: <http://www.metavr.com/casestudies/UAVvisual.html> (2005 január)
A magyar nyelvű feliratokat készítette Molnár András
- 1.10. kép **A „Meta VR inc” szimulációs moduljának felhasználói felülete**
Forrás: <http://www.metavr.com/casestudies/UAVvisual.html> (2005 január)
A magyar nyelvű feliratokat készítette Molnár András
- 1.11. kép **Az „Unmanned Dynamics LLC” szimulátora által kezelt UAV-k**
Forrás: <http://www.u-dynamics.com/aerosim/default.htm> (2005. január)
- 1.12. kép **Az „Unmanned Dynamics LLC” szimulátóának felhasználói felületei**
<http://www.u-dynamics.com/aerosim/> (2005. január).
A magyar nyelvű feliratokat készítette Molnár András

- 1.3. kép **Az „MP 2000” robotrendszer felhasználói felülete**
 Forrás: Az „MP 2000” szimulációs program
 A képen látható szimulációs állapotot beállította és a képet készítette Molnár András
- 1.14. kép **Az „FMS” szimulátor program képe**
 Forrás: http://n.ethz.ch/student/mmoeller/fms/index_e.html (2005 január)
 A képet az „FMS” program segítségével készítette Molnár András
- 1.15. kép **Az „Aero Fly” szimulátor program képe**
 Forrás: <http://ipacs.de/afold/> (2005 január)
 A képet az „Aero Fly” program segítségével készítette Molnár András
- 2.1. kép **Lehajtott ívelőlapok**
 Forrás: <http://www.pbases.com/clements/image/34464212> (2005. február)
- 2.2. kép **Levegővel felfúj, változtatható geometriájú szárny**
 Forrás: David C. Tim S. Frank U. Matt M. *Morphing Inflatable Wing Development for Compact Package Unmanned Aerial Vehicles* American Institute of Aeronautics and Astronautics 2002
- 2.3. kép **Elektromos árammal fűtött huzallal üzemelő habvágó gép**
 Forrás: <http://www.sea-gull.demo.co.uk/> (2004. december)
- 2.4. kép **Kombinált hajtáslánc**
 Forrás: A képet készítette Molnár András
- 2.5. kép **A „MAND1” robotrepülőgép**
 A repülőgépet készítette Molnár András
- 2.6. kép **A „MAND1” robotrepülőgéppel készített videofelvétel részlete**
 A felvételt készítette Molnár András
- 2.7. kép: **Személyi monitorral ellátott robotrepülőgép-rendszer**
 A képet szerkesztette Molnár András
- 2.8. kép **A „MAND3” robotrepülőgép**
 A repülőgépet készítette Molnár András
- 2.9. kép **A „MAND3” robotrepülőgép szárnyának építési fázisai**
 A repülőgépet készítette Molnár András
- 2.10. kép **A „MAND4” robotrepülőgép**
 A repülőgépet készítette Molnár András
- 2.11. kép **A „REKA1” robotrepülőgép**
 A repülőgépet készítette Molnár András
- 2.12. kép **A „REKA1” robotrepülővel készített videofelvétel képkockái**
 A felvételt készítette Molnár András
- 2.13. kép **A video képek rögzítésére szolgáló földi egység**
 A képet készítette Molnár András
- 2.14. kép **A „Warrior” robotrepülőgép**
 A repülőgépet készítette Molnár András
- 2.15. kép **A „Warrior” robotrepülőgépről indítható rakéta**
 A repülőgépet készítette Molnár András
- 4.1. kép **Az „AEROBOT” robotpilóta harmadfokú átviteli függvényének (emelkedés) szimulációja**
 A szimulációt a „LabView” program segítségével készítette Molnár András
- 4.2. kép **Az „AEROBOT” robotpilóta harmadfokú átviteli függvényének (sebeességnövelés) szimulációja**
 A szimulációt a „LabView” program segítségével készítette Molnár András
- 4.3. kép **Az „AEROBOT” robotpilóta harmadfokú átviteli függvényének (turbulencia és gerjedés) szimulációja**
 A szimulációt a „LabView” program segítségével készítette Molnár András
- 4.4. kép **Az „AEROBOT” robotpilóta egység és annak blokkvázlata**
 A robotegységet készítette Molnár András
- 4.5. kép **Kísérleti robotautó**
 A kísérleti robotautót egy LEGO autó vázára szerelte fel Molnár András

- 4.6. kép **Parallaxis hiba**
Képet készítette Molnár András
- 4.7. kép **A „TIRMO” robotrepülőgép**
A repülőgépet átalakította és üzemeltette Molnár András

Táblázatjegyzék

1. táblázat **Dragon Eye kísérleti robotrepülőgép főbb adatai**
Forrás: <http://www.strikenet.js.mil/uavairshow/dragoneye.htm> (2005. január)
2. táblázat **Pointer kísérleti robotrepülőgép főbb adatai**
Forrás: <http://www.aerovironment.com/area-aircraft/prod-serv/pointer.html> (2005. január)
3. táblázat **„Bidrone” kísérleti robotrepülőgép főbb adatai**
Forrás: <http://www.alcore-tech.com/default.htm> (2005. január)
- 2.1. táblázat **A „MAND” repülőgépek hajtásláncainak hatása**
A méréseket végezte Molnár András
- 2.2. táblázat **A „MAND” repülőgépek főbb paraméterei**
A repülőgépeket készítette Molnár András
- 3.1. táblázat **A „NavStar” GPS vevő által elért pontosság**
A méréseket végezte Molnár András
- 3.2. táblázat **A „Jupiter” GPS vevő által elért pontosság**
A méréseket végezte Molnár András

Felhasznált irodalom

1. Budó Ágoston, *Kísérleti fizika I*, Egyetemi Tankönyvkiadó, Budapest, 1975
2. Jereb Gábor, *Vitorlázó repülőgépek*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977
3. Eric N. Johnson, Mathew G. Hart, Henrik B. Christophersen, *Development of an Autonomous Aerial Reconnaissance system at Georgia Tech*, School of Aerospace Engineering Georgia Institute of Technology 2002
(www.micropilot.com)
4. Riccardo Rocca, *Launching the Roboat*, Circuit Cellar The Magazine for Computer Applications, issue 115 in February 2000
(users.libero.it/riccardo/roboat.htm)
5. DesignFoil R 5.32, szélcsatorna szimulátor program
(<http://www.digital-flight.com/designfoil.htm>) (2005)
6. LTC Rene' Burgess, *Virtual Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Integrated Training in the U.S. Army* in U.S. Army, MV4473, 19 MAR 2002
(<http://www.metavr.com/casestudies/uavtraining.html>)
7. *MP 1100/MP 2000 Installation and Operation*
MicroPilot, 298 Garry St. Winnipeg Manitoba Canada, R3c 1H3, 1998-2001
(<http://www.micropilot.com>) (2002)
8. ESRI GIS and Mapping Software, ERSI 380 New York Street, Redlands, CA 92378-8100, UAS 2004
(<http://www.ersi.com>)
9. H. Zoltán, *Pilóta nélküli repülőgépek útvonaltervezése digitális domborzatmodell alkalmazásával* Gazdságosság, hatékonyság és biztonság a repülésben Tudományos Konferencia, Szolnok 2004. április 23. p.10
10. Dr. B. Gyögy, szerk. Magyar Modellező Munkaszövetség, *A modellrepülés elmélete*, kiadó: Magyar Repülő Szövetség, 1952
11. *Aussie First, Operational Deployment of UAVs*, JED, The Journal of Electronic Defense, September, 2003. p. 36-64.
12. André J. Colt, *Airspace Policy and Air Traffic Management*, RTO EN-9 course on „Development and Operation of UAVs Military and Civil Applications”, 13-17 September 1999. p.26

13. Bernard C. Rogers, *Design and Airworthiness Requirements for Military Unmanned Air Vehicle Systems*, RTO EN-9 course on „Development and Operation of UAVs Military and Civil Applications”, 13-17 September 1999. p.14
14. D. R. Haddon, C. J. Whittaker, *Aircraft Airworthiness Certification Standards for Civil UAVs*, UK Civil Aviation Authority, August 2002. p. 15
15. Joel M. Grasmeyer, Matthew T. Keennon, *Development of the Black Widow Micro Air Vehicle*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. with permission, 2001 p.9
16. AEROSIM BLOCKSET Version 1.1 User’s Guide 2005
(http://www.u-dynamics.com/aerosim/aerosim_ug.pdf)
17. Roland E. Weibel and R. John, Hansman, Jr. *Safety Considerations for Operation of Different Classes of UAVs in the NAS*, AIAA-2004-6421. AIAA’s 4th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum. 20 - 22 September 2004. Chicago, Illinois.
18. David C. Tim S. Frank U. Matt M. *Morphing Inflatable Wing Development for Compact Package Unmanned Aerial Vehicles* American Institute of Aeronautics and Astronautics 2002
19. Dr. Gruber József, ifj. Szentmártony Tibor, *Gázdinamika*, Egyetemi Tankönyv, Tankönyvkiadó, Budapest, 1954.
20. Szerzői kollektíva: *Katonai térképészeti ismertek* (szerk.: Dr. Paskó József) I-II. ZMNE, Budapest 1997.
21. Szabóné dr. Szalánczi Erika: *Digitális kartográfia* - egyetemi jegyzet. ZMNE, Budapest 2001.
22. Szabolcsi Róbert, Pokorádi László, *Computer Aided Design of the Controller for the Aircraft Autopilot*, Bulletins for Applied Mathematics BAM 1596/98 LXXXVII, p. 35–44.
23. Dr. Takács László, *Kézikönyv repülőknél /Tankönyv a közforgalmon kívüli helikoptervezető növendékek elméleti vizsgára történő felkészítéséhez/*, Sky Home Service kiadása
24. *Műszaki lexikon III. kötet*, főszerk. Polinszky Károly, Akadémia kiadó, Budapest 1974
- I.1. Real-Time Hardware-in-the-Loop Simulation by OPAL-RT
<http://www.opal-rt.com/index.html> (2002)

- I.2. Software Solution for Autonomous Vehicles
<http://www.u-dynamics.com> (2002)
- I.3. Roman & Michael Möller, Flying-Model-Simulator (2002)
<http://simulator.home.pages.de>
- I.4. Aerofly the Professional RC Flight Simulator
<http://ipacs.de/afold/> (2005), <http://aerofly.de> (2002)
- I.5. Introduction to the Global Positioning System for GIS and TRAVERSE
<http://www.cmtinc.com/gpsbook/index.htm#chap> (2005)
- I.6. Szárnyprofil adatbázis
<http://www.nasg.com/afdb/list-airfoil-e.phtml> (2002)
- I.7. Dragon Eye (DE) Interim-Small Unit Remote Scouting System (I-SURSS)
<http://www.strikenet.js.mil/uavairshow/dragoneye.htm> (2002)
- I.8. AeroVironment Unmanned Air Vehicles (Pointer)
<http://www.aerovironment.com/pointer> (2002)
- I.9. ALCORE Technologies (BIDRONE)
<http://www.alcore-tech.com/default.htm> (2002)

Publikációim

Hivatkozások publikációimra

- IC13. Berns, K.,(1999) Technical Task 3. Operational Environment - Specification for Robots, CLAWAR'99, Portsmouth, (Virk, Randall, Howard (Eds.)), Professional Engineering Publishing Limited, London, pp.763-772, 1999.
- IC12. Greguss, P., Vaughan, A. H. Development and Optimization of Machine Vision Systems Using a Panoramic Annular Lens, ICAR 1999, The 9th International Conference on Advanced Robotics, Tokyo, 26. 10. 1999.
- IC12. I.Nagy, P. Baranyi, P. Greguss, P. Korondi, H. Hashimoto, (2000)"Vector Field Based Guiding Model for Mobile Robots as an Intelligent Transport System, Proceedings of EPE-PEMC2000-9th Power Electronics and Motion Control International Conference, Kosice, Slovak Republic 5-7 Septemeber 2000 Vol. 1. pp. 7-52-57.
- IC12. Nagy, P. Baranyi, P. Greguss, P. Korondi, H. Hashimoto (2000)"Extension of Potential Based Guiding to Vector Field Model" OPTIM 2000, Brasov, May 11-12, 2000, vol. 2. Pp.545-550.
- IC12. P. Szemes, Z. Förhécz, B. Magyar, P. Korondi, H. Hashimoto (2001)"A General Concept of the Internet-based Telemanipulation" In Proc. of 10th International Conference on Advanced Robotics ICAR 2001 (Ed. A. K. Bejczy, K. Kozłowski, I. J. Rudas) 22-25 August, 2001, Budapest, pp. 363-368.

Nemzetközi konferenciák proceedings-eiben megjelent közlemények:

- IC1.Z. Vámosy, B., Fekete, L., Nyitrai, **A., Molnár** (2004), Ultrasonic Based Device for Blind and Visually Impaired People, Proc. 13th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, (Ed: Z., Kolibal) Brno, ISBN 80-7204-341-2, pp 405-407.
- IC2.**A. Molnár**, Z. Vámosy (2004), Navigation of a GPS Based Robot Vehicle, Proc. 13th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, (Ed: Z., Kolibal) Brno, ISBN 80-7204-341-2, pp 408-413.
- IC3.Z. Vámosy, **A. Molnar**, A. Balázs, B. Pécskai, B. Supola (2004), FOBOT, the Hexapod Walking robot, *Proc. 35nd International on Robotics – ISR 2004* (Paris, March 23-26, 2004) , Paris – Nord Villepinte, France Abstract: pp. 15-16 and Full text, CD: TU 21-4 (6 page).
- IC4.I. Makkay, **A. Molnár**, A. Turoczy (2003), Stabilization concepts of UAVs, in: UAV-NET Meeting #8, (Belgium, September 22-23 2003) Belgium, Sonaca.
- IC5.I. Makkay, L. Ványa, **A. Molnár**, L. Kovács (2003), Advanced electronics for helicopter and rigid wing UAVs, UAV-NET Meeting #7, (Paris, June 16-17 2003) France, Paris.
- IC6.Makkay I., Haig Z., Vass S., Vanya L., Kovacs L., **Molnar A.**, Gacser Z. (2003), New Perspectives for Guidance and Propulsion Systems for UAVs, North Atlantic Treaty Organization, Applied Vehicle Technology Panel, (Brussels, April, 07-10, 2003)Brussels, Belgium.
- IC7.**Molnár, A.**, Vámosy, Z. (2001), Experimental Biped Robot Using SMA Actuators, *Proc. 4nd International Conference on Climbing and Walking Robots – CLAWAR 2001*, . Karlsruhe, Deutschland (Eds. K. Berns and R. Dillmann) pp. 811-818.
- IC8.**Molnár, A.** Vámosy, Z. (2001) Navigation of Mobile Robot Using PAL Optic, Proc. 10th International Conference on Advanced Robotics ICAR 2001, Workshop on Omnidirectional Vision (Ed. Pal Greguss), 22-25 August, 2001, Budapest, pp. 89-92.
- IC9.**Molnár, A.**, (2001). Decision Making Systems in Forced Situations, *Proc 10th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region - RAAD'01 (Vienna, May 16-18, 2001)*, Vienna, Austria, (Ed. P. Kopacek), Session : FA 3 – Various, Ref. No.:RD-46.
- IC10. **Molnár, A.**, Brünner, R.,Varga, L, (2001). Vehicle Controller Agents and their Computer Aided Simulation *Proc. 10th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region - RAAD'01 (Vienna, May 16-18, 2001)*, Vienna, Austria, (Ed. P. Kopacek), Session : FM 2 – Simulation, Ref. No.:RD-53.
- IC11. **Molnár, A.**, Brünner, R., Varga, L., (2000).Parallel Picture Processing for an Intelligent Car Navigation System, *Proc. The 11th INTERNATIONAL DAAAM SYMPOSIUM 2000*, Opatija, Croatia. (B. Katalinic (Ed.)), DAAAM International, pp.317-318.
- IC12. Vámosy, Z., **Molnár, A.** (1999), Obstacle Avoidance for a CLAWAR Machine, *Proc 2nd International Symposium on Climbing and Walking Robots - CLAWAR '99*, Portsmouth, England, (G. Virk (Ed.)) pp. 597-603.

- IC13. Vámosy, Z., **Molnár, A.**, Brünner, R., Varga, L., (1998). EXPLORADORES II., the Four-Legged Mobile Robot, *Proc International Symposium on Climbing and Walking Robots - CLAWAR'98*, Brussel, Belgium, (Y. Baudoin (Ed.)) BSME. pp. 41-45.
- IC14. Vámosy, Z., **Molnár, A.**, Brünner, R., Varga, L., (1998). Path Planning Methods for a Quadruped Mobile Robot, *Proc. DAAAM'98*, Cluj-Napoca, Romania. (B. Katalinic (Ed.)), DAAAM International, pp. 483-484.
- IC15. Brünner, R., **Molnár, A.**, Varga, L., Vámosy, Z. (1998). Exploradores, Quadruped Robot, *Proc. 7th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region - RAAD'98* Bratislava, Slovakia. (Slovak Academy of Sciences), (K. Dobrovodský (Ed.)), pp. 215 - 220.

Hazai folyóiratban megjelent közlemény:

1. Vámosy, Z., **Molnár, A.** (1999), Exploradores, négylábú lépegető robot készítése, *Híradástechnika*, I. évfolyam, 1999/9 pp. 50-76.

Hazai konferenciák proceedings-eiben megjelent közlemények:

- NC1.Z. Vámosy, **A. Molnár**, P. Hirschberg, Á. Tóth, B. Máthé (2004), Mobil Robot Navigation Projects at BMF NIK, on:International Conference in Menoriam John von Neumann, (Hungary, December 12 2004) Hungary, Debrecen.
- NC2.**Molnár A.** (2003). New Perspectives of UAV Building and Propulsion in case of Engine Failure in: PAMM-PC 141 conference 2003 május 23. Balatonalmádi.
- NC3.**Molnár, A.** (2002). Unmanned Aerial Vehicles with Eelectric Propulsion, Robothadviselés (Robot Warfare), Nemzetközi Konferencia és Kiállítás, 2002, november 27-28, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, Budapest
- NC4.**Molnár, A.** (2002). Elektromos hajtású robotrepülőgépek, Haditechnika 2002 Nemzetközi Szimpózium, 2002. szeptember 16-17, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Bolyai János Katonai Műszaki Főiskolai Kar, Budapest, ISSN:1416-1443, Bolyai Szemle különszám II. pp. 21-33.
- NC5.**Molnár, A.** (2002). Napelemes Robotok, *Proc 7th International Symposium on Electronics and Automation HUNGELEKTRO – HUNGAMAT 2002*, ((Ed. M., Lambert)). CD.: Napelemes Robotok (p. 6). Budapest
- NC6.**Molnár, A.** (2001). KUTATÓ ROBOTOK, Hadtudományi tájékoztató 2001/7. szám, Robothadviselés (Robot Warfare), Nemzetközi Konferencia és Kiállítás, 2001, április 24-25, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, Budapest, pp.82-89.
- NC7.**Molnár, A.** (2001). Intelligens, Önfenntartó Robot, *Proc. 6th International Symposium on Electronics and Automation HUNGELEKTRO – HUNGAMAT 2001*, ((Ed. M., Lambert)) Budapest. pp. 121-127.
- NC8.**Molnár, A.** (2000). "KUTYA" Lépegető robot, *Proc. 5th International Symposium on Electronics and Automation HUNGELEKTRO – HUNGAMAT 2000*, ((Ed. M., Lambert)) Budapest. pp. 85-91.
- NC9.**Molnár, A.**, Vámosy, Z. (1999), Hatlábú oktatórobot, Banki Donát Műszaki Főiskola Jubileumi Ülésszaka, *Proc. the Jubilee International Conference*, (Ed. Rudas). pp. 399-400.
- NC10. Vámosy, Z., **Molnár, A.**, Brünner, R., Varga, L., (1999). Négylábú lépegető robot fejlesztésének eredményei, különös tekintettel a szenzor alapú vezérlésre, *Proc. 4th International Symposium on Electronics and Automation HUNGELEKTRO - HUNGAMAT'99*, ((Ed. M., Lambert)) Budapest. pp. 113-118.
- NC11. Brünner, R., **Molnár, A.**, Varga, L., Vámosy, Z. (1998). Exploradores, négylábú robot, In: *XV. Centenáriumi Tudományos Ülésszak KKMFF*, Vol. Szabályozástechnika-Robottechnika, Budapest . pp. 36-41.