

Opponensi vélemény

Szabolcsi Róbert

“Állami Célú, Kisméretű Pilóta Nélküli
Légijármű Rendszerek Konceptcionális-, és
Számítógéppel Támogatott Előzetes Tervezése
és Vizsgálata”

című MTA doktori értekezéséről

Témaválasztás, bevezető megjegyzések

A vezető nélküli légi járművek és rendszerek (UAV/UAS) kiemelkedően fontosak számos civil és katonai célú alkalmazásban, ezek kezelése és tervezése számos kihívás elé állítja a mérnöki megközelítést és tervezést. A disszertáció katonai alkalmazású, kisméretű UAV/UAS rendszerek koncepcionális és előzetes tervezésével, valamint az UAV-k fedélzeti automatikus repülésszabályozó rendszereinek, illetve robotpilótáinak tervezésével foglalkozik, amelyek képesek mind normál, mind pedig veszélyes repülési helyzetben irányítani, és biztonságosan leszállítani az UAVt.

A disszertációban vizsgált kutatási célok az alábbi területeket ölelik fel: az UAV/UAS rendszerek alrendszereinek, és fontosabb elemeinek meghatározása, az UAV-k matematikai modellezése és repülésdinamikai modelljeinek meghatározása, a repülési környezet (légköri turbulencia) matematikai modellezése, majd ezek alapján automatikus repülésszabályozó rendszerek tervezése a klasszikus és modern irányításelméleti módszerek felhasználásával. Külön hangsúlyt kapott a dolgozatban belül a holtidők lineáris közelítése és a holtidős zárt szabályozási rendszerek vizsgálata, végül pedig az UAV-k típus és légialkalmassági követelményrendszerének felállítása. Az eredmények illusztrálása a Trainer-60 'Boomerang' merevszárnyú, klasszikus aerodinamikai elrendezésű és irányítású, villamos hajtású, kisméretű, merev szerkezetű repülőgéphez kapcsolódnak.

A disszertáció témaválasztása korszerűnek mondható, a téma érdekes, a problémakör fontossága magától értetődő. A dolgozat olyan modellezési és irányításelméleti eljárásokat mutat be amelyek eredményei sikeresen építhetők be az UAV/UAS rendszerek tervezése, a repülésszabályozó rendszerek tervezése és vizsgálata valamint a holtidős repülésszabályozó rendszerek irányításainak analízise és szintézise eszköztárába.

Általánosan megállapítható, hogy a dolgozatban felvonultatott matematikai eszközök szintje és azok használata megfelel a kitűzött célkitűzéseknek, potenciálisan alkalmas a feladatok megoldására.

Formai észrevételek

Az igényes magyar nyelvű dolgozat 254 számozott oldal terjedelmű, beleértve az irodalomjegyzéket. A fejezetek jól strukturáltak. A saját eredmények és az őket alátámasztó publikációs hivatkozások jól elkülönülnek a szövegben. Az értekezésben szereplő ábrák segítik a leírtak megértését, szerkesztésük általánosságban tetszetős. A szövegben előforduló viszonylag kevés elütés nem befolyásolja érdemben a megértést. A tézisfüzet szövegében is csak néhány elütést találhat az olvasó.

Összességében megállapítható, hogy az értekezés teljesíti az MTA doktora értekezésekkel szemben támasztott formai követelményeket.

Az egyes fejezetekhez tartozó tartalmi megjegyzések és kérdések

Az olvasást megkönnyítendő a dolgozat tartalmazza a használatos rövidítések listáját és az egyes fejezetek végén a kapcsolódó publikációk listáját.

1. és 2. fejezet egy rövid motivációs háttérrel ad és leírja a megoldandó problémákat. Ezután a második fejezet részletesen foglalkozik a tudományos előzményekkel, és bővebben kifejti a kutatási témát, megfogalmazza a kutatási célokat. A szerző felsorolja a kutatás alapjául szolgáló hipotéziseket, a kutatási módszereket és az alkalmazott eszközöket, valamint megfogalmazza a kutatás várható eredményeit.

3. fejezet bemutatja egy országos, reprezentatív, alapvetően szakmai-tudományos célú felmérés eredményeit, amelyek nagyban segíthetik a tervezők és a tanúsító szakemberek munkáját. Az itt bemutatott eredményekre és megállapításokra támaszkodva a szerző egy új, a perimetrikus védelmi rendszerek elemeként szolgáló, autonóm, multirotoros UAV rendszer koncepcionális alapjait fogalmazza meg, meghatározva a rendszertervezés fontosabb lépéseit, amelyek elvezethetnek egy prototípus UAS rendszerhez.

Kérdés: a felmérés óta eltelt időre tekintettel (2007) mennyire helytállóak ma a felmérés egyes következtetései?

4. fejezet olyan eljárásokat fogalmaz meg, amelyek célja, hogy segítse az UAV/UAS rendszerek identifikációs célú tesztrepüléseinek tervezését és szervezését. Az eljárás eredményeként identifikációra alkalmas idősorok állnak elő az egyes modellosztályokhoz amik alapján a megfelelő linearizált dinamikus modellek sikerrel identifikálhatóak. Az identifikált modellek az UAV-k repülésszabályozó rendszereinek tervezése során kerülnek felhasználásra. A modellbizonytalanságok tekintetében e fejezet foglalkozik az UAVk külső zavarásainak (légköri turbulencia) valamint a dinamikus rendszerek paraméterbizonytalanságainak modellezésével is. Megjegyzendő, hogy ebben a kategóriában a turbulenciából eredő légerők számottevő törzs, illetve szárny deformációt idéznek elő, amelyeket még a tervezések koncepcionális szakaszában modellezni, vizsgálni szükséges.

5. fejezet célkitűzése, hogy segítséget nyújtson olyan kérdések megoldásában, ami a hazai szabályozó környezetben nem megoldott (pl. a légi alkalmassági tanúsítás kritériumrendszere), de nemzetközi környezetben számos eleme már megoldott, és rendelkezésre áll. Ami az úgynevezett irányítási performancia kritériumokat illeti, ebben a fejezetben a szerző a lineáris LTI klasszikus paradigma mentén az UAV/UAS rendszerek fedélzeti automatikus repülésszabályozó rendszere típus és légialkalmassági vizsgálatához követelményrendszert dolgozott ki, amely lehetővé teszi az UAV hossz és az oldalirányú irányítási csatornáinak vizsgálatát, és megfelelési tanúsítását.

6. és 7. fejezet az LTI szabályozási rendszerek tervezésének általánosan elfogadott menetét és módszertanát írja le. Egy széles körben használt UAV (Trainer-60 'Boomerang') dinamikai modelljeit alapul véve demonstrálja egyrészt a klasszikus (PID, LQP/PID) másrészt a modern (pólus áthelyezés, LQR, LQG, H₂, H_{inf}, MPC) szabályozótervezési eljárást, részleteiben bemutatva a tervezés menetét. A módszerek és az eredmények relevánsak, jól közelítik a SUAV kategóriában számos típus viselkedését.

Kérdés: A fejezet folytonos idejű modellekre tartalmaz eredményeket. Az implementáció során mennyire befolyásolja az eredményeket a diszkretizáció (mintavételi idő)?

Kérdés: Mennyire alkalmasak az agresszív manőverek tervezésére/kivitelezésére a felvonultatott módszerek?

8. fejezet a holtidő kérdéskörével foglalkozik, ami lényegesen befolyásolja azon UAV/UAS rendszerek működését, ahol az UAVt automatikus, szervo hajtással rendelkező antenna-rendszer követi. A másik ok, ami hangsúlyossá teszi ezt a kérdéskört, az emberi tevékenységek holtideje. A fejezet részletesen foglalkozik a holtidő lineáris, Padé-approximációs közelítésének matematikai problémájával, meghatározva a közelítésnek azt a rendszámát, amely lehetővé teszi a holtidő kielégítően pontos közelítését. Az UAV-kat leíró matematikai modellek paramétereit (erősítés, időállandó, holtidő) figyelembe véve meghatározhatók azok a kritikus értékek, ahol a zárt irányítási rendszerek elvesztik stabilitásukat.

9. és 10. fejezet összegezi a dolgozat eredményeit, felsorol néhány jövőbeni kutatási irányt majd megfogalmazza a téziseket.

A disszertációban bemutatott módszerek és eredmények széleskörű gyakorlati hasznosíthatósággal bírnak.

A tézisek felsorolása

1. téziscsoport a szerző módszertant dolgozott ki egy reprezentatív szakmai-tudományos felmérés lebonyolítására. Ennek alapján egy reprezentatív felmérést hajtott végre az UAV/UAS rendszerekkel szemben támasztott elvárások, műszaki követelmények és tartalmak azonosítására. A felmérés eredményeire támaszkodva megalkotott egy rendszer koncepciót egy olyan UAS rendszer tervezése, amely úgy katonai mint nem katonai céllal sikeresen használható felderítési feladatokra, illetve a perimetrikus védelmi rendszerek új eleme is lehet.

- (a) Reprezentatív szakmai felmérés adatai alapján műszaki követelmény-rendszert alkotott meg, amely a prototípus UAV/UAS rendszer tervezésekor jól használható.
- (b) Megalkotott egy multirotoros UAV-ra épülő biztonsági rendszer új al-rendszerének (Night Watchbird UAV System) koncepcióját, amely alkalmas nagy területen elhelyezkedő polgári-, és katonai objektumok perimetrikus védelmének segítésére, és az erők védelme hatékonyságának javítására.

A tézishez 12 publikáció (8 konferencia, 4 folyóirat) tartozik.

2. téziscsoport A légköri turbulencia egyes sebességi összetevőinek különféle kezdeti feltételek mellett történő előállítására lineáris szűrőt tervezett, melynek segítségével fehér zajból, az egyes időjárási feltételeknek megfelelő és az UAV test-koordináta rendszerének tengelyeire eső véletlen szélesebbeségi vektorok idősorai számítógépes modellezés során könnyen előállíthatóak.

A tézishez 6 publikáció (4 konferencia, 2 folyóirat) tartozik.

3. téziscsoport UAV aeroelasztikus mozgásának modellezése során bebizonyította, hogy:

- (a) a rugalmas deformációk matematikai modellje hozzáadódik a merev légi jármű (UAV) térbeli mozgásának matematikai modelljéhez, vagyis az aeroelasztikus UAV modellek, mint additív paraméterbizonytalanságok viselkednek;
- (b) az UAV törzsének lengésképe kiemelkedő fontosságú a fedélzeti érzékelők, mint például a szögsebesség-érzékelők, és a gyorsulásmérők beépítési helyének meghatározása során.
- (c) az aeroelasztikus légi járművek valós mozgásdinamikája jól használható a légi járművek automatikus repülésszabályozó rendszerei dinamikus szabályozóinak tervezése során.
- (d) az UAV térbeli mozgásának identifikálása során elengedhetetlenül szükséges az a matematikai rendszermodell, amelynek formájában keressük az identifikálandó rendszermodellt, melyre több alakot is javasoltam, mint például az állapotterez rendszermodell, vagy az átviteli függvény úgy zavarásmentes, mint zajos alakban.

A tézishez 9 publikáció (6 konferencia, 3 folyóirat) tartozik.

4. téziscsoport Bebizonyította, hogy az UAV/UAS rendszerek típus-, és légi-alkalmasságának tanúsítása egyaránt szolgálja a tervezők, a gyártók, az üzemeltetők érdekeit és lényeges mértékben javítja az UAV/UAS rendszerek repülésbiztonságát:

- (a) alapvető fogalmakat és definíciókat vezetett be az UAV/UAS rendszerek típus-, és légi-alkalmasságának mérésére, valamint azonosította az UAV/UAS rendszerek típus-, és légi-alkalmasságának tanúsításához szükséges repülési paraméterek jellemzői

- (b) követelményrendszert dolgozott ki, amely lehetővé teszi az UAV hossz-irányú, és az oldalirányú irányítási csatornáinak vizsgálatát, és megfelelési tanúsítását. A számítógépes szimulációkhoz MATLAB környezetet alakított ki.

A tézishez 12 publikáció (2 konferencia, 10 folyóirat) tartozik.

5. téziscsoport Az UAVk automatikus repülésszabályozó (robotpilóta) rendszereinek tervezése során széles körben használatosak a modern számítógépes tervező rendszerek, amelyek lényegesen lerövidítik egy-egy UAV prototípusának fejlesztési idejét, csökkentik a költségeket, és javítják a hatékonyságot:

- (a) PID-szabályozót tervezett, illetve a pólus allokáció elvére épülő szabályozótervezést hajtott végre a 'Trainer-60' SUAV identifikált modelljein.
- (b) az LQR tervezési módszer segítségével optimális szabályozót tervezett a 'Trainer-60' SUAV részére. Igazolta a módszer alkalmazásának előnyeit, és vizsgálta az alkalmazásának korlátait is.
- (c) a hagyományos, egyszerű LQG tervezési módszer segítségével optimális szabályozót tervezett a 'Trainer-60' SUAV részére. Bebizonyította, hogy az LQG módszer jól alkalmazható a sztochasztikus külső zavarások és belső zajok jelenléte mellett, igazolta a módszer alkalmazásának előnyeit, és vizsgálta az alkalmazásának korlátait.
- (d) elvégezte a „Trainer-60” SUAV robotpilótájának előzetes tervezését a H2 és Hinf kritérium szerint is. Igazolta e módszerek alkalmazhatóságát, és bebizonyította az egyes módszerek alkalmazásának előnyeit, és vizsgálta az alkalmazásuk korlátait. Megállapította, hogy az alkalmazott tervezési eljárások segítségével a zárt szabályozási rendszerek előírt minőségi jellemzői biztosíthatóak.
- (e) csúszó horizontú MPC szabályozások elméleti hátterét foglalta össze, és igazolta, hogy a módszer jól használható UAVk robotpilótáinak tervezése során, amikor is a lekövetendő referencia jel jól mintázza a tipikus UAV repülési helyzeteket akár normál, akár veszélyes repülési helyzetekben is.

- (f) A szabályozók tervezéséhez MATLAB függvénykönyvtárat hozott létre, amely magába foglalja úgy a rendszertervezést, mint a megtervezett zárt szabályozási rendszer stabilitásvizsgálatát, valamint a szűkebb értelemben vett minőségi jellemzők (pl. tranzienst idő, túlszabályozás, erősítési tartalék, fázistartalék) számítását is.

A tézishez 18 publikáció (6 konferencia, 12 folyóirat) tartozik.

6. téziscsoport A holtidő matematikai modellezése elengedhetetlen, főleg erre érzékeny irányítási rendszerekben. A holtidő lineáris közelítésére a Padé approximáció módszerét alkalmazta.

- (a) számításokkal és számítógépes szimulációkkal bebizonyította, hogy megfelelő pontosságú közelítés $n=5$, és ettől magasabb rendszámok esetén várható. A közelítés felső rendszáma $n=69$, amikor még nem lehet felinstabilitás a közelítő holtidős modellek viselkedésében.
- (b) megállapította, hogy az UAV kezelők (operátorok) tevékenységének modellezésére számos modell ismert, és alkalmazott. Elvégezte az egyes matematikai modellek vizsgálatát, meghatározta a rendszermodellek jellemzőit, amelyek befolyásolják a zárt szabályozási rendszerek stabilitását.
- (c) Az UAV kezelők PD-TD modelljét alapul véve, meghatározta az UAV operátor holtidejének, erősítésének, és a predikciós időállandójának kritikus értékeit, amelyek destabilizálják a zárt UAV PiL szabályozási rendszer viselkedését. Vizsgálatait a dőlési szög PiL-stabilizáló rendszerre végezte el.
- (d) A matematikai és az irányításelméleti feladatok megoldására MATLAB függvénykönyvtárat hozott létre.

A tézishez 8 publikáció (1 konferencia, 7 folyóirat) tartozik.

Összefoglaló vélemény

Megállapítható, hogy a pályázó új tudományos eredményeket ért el a PhD fokozat megszerzése óta. A téziseket a pályázó önálló, új tudományos eredményeiként elfogadom. A doktori munka eredményeit elegendőnek tartom az MTA doktori cím megszerzéséhez és javaslom a nyilvános vita kitűzését valamint sikeres védés esetén az MTA doktora cím odaítélését.

Budapest,
2024, Július 30



Dr. Szabó Zoltán
MTA Doktora,
egyetemi tanár