

# Opponensi vélemény Szabolcsi Róbert: ÁLLAMI CÉLÚ, KISMÉRETŰ PILÓTA NÉLKÜLI LÉGIJÁRMŰ RENDSZEREK KONCEPCIONÁLIS-, ÉS SZÁMÍTÓGÉPPEL TÁMOGATOTT ELŐZETES TERVEZÉSE ÉS VIZSGÁLATA című MTA doktori értekezéséről

Bauer Péter

2024. október 2.

A mű 254 számozott oldalból áll, így eleget tesz a hadtudományi MTA doktori művektől elvárt minimum 128, maximum 256 oldalas terjedelemnek. Ugyanakkor előnyére szolgált volna még egy átolvasás, illetve az ismétlődő részek (pl. felsorolások) csupán egyszeri közlése és utána csak hivatkozása. A talált pontatlanságokat csupán a teljesség kedvéért sorolom fel a 2 fejezetben, ezekre részletes szerzői reakciót nem kérek.

A dolgozat az irodalomjegyzéket nem számolva összesen tíz fejezetből áll. Az 1. adja meg a bevezetést és motivációt, a 2. a szakmai-tudományos előzményeket. A 3. fejezet foglalkozik az UAV követelmény felméréssel és a Night Watchbird koncepció kidolgozásával. A 4. fejezetben a repülésdinamikai modellek ismertetése mellett sor kerül a turbulencia modellek és rugalmas törzs hatások részletes tárgyalására. Az 5. fejezet foglalkozik a UAV típus- és légialkalmassággal, a 6. pedig felvezeti az előzetes szabályzótervezés módszertanát és folyamatát. A 7. fejezet mutatja be a konkrét szabályzó tervezési megoldásokat, PID, LQR, LQG,  $\mathcal{H}_2$ ,  $\mathcal{H}_\infty$  és MPC sorrendben. A 8. fejezet foglalkozik a holtidős tagok és a UAV operátorok modellezésével. A 9. fejezet összefoglalója után következik a tézisek és a kapcsolódó irodalmak ismertetése a 10. fejezetben. Ez a külön összefoglaló fejezet kifejezetten tetszett. A dolgozat a szerző pályájához illeszkedő módon szerteágazó témaköröket taglal részletesen, tankönyvi stílusban és illusztrációkkal. Ugyanakkor a disszertáció lényegi részéhez számtalan szakmai kérdésem és megjegyzésem van, ezeket az 1 fejezet tartalmazza és kérem a jelölt által való részletes megválaszolásukat.

A tézisek értékelését az alábbiakban teszem meg:

I. A **TI** tézis bevezető állításból és 2 pontból áll:

"Módszertant dolgoztam ki reprezentatív szakmai-tudományos felmérés lebonyolítására, melynek segítségével országos, reprezentatív felmérést hajtottam végre az UAV/UAS rendszerekkel szemben támasztott elvárások, műszaki követelmények és tartalmak azonosítására. A felmérés összegzett, és kiértékelt eredményeire támaszkodva megalkottam egy merőben új UAV/UAS rendszer koncepcióját, amelyre építkezve elkezdődhet egy olyan UAS rendszer koncepcionális, és előzetes tervezése, amely úgy katonai-, mint nem

katonai céllal sikeresen használható majd felderítési feladatokra, illetve a perimetrikus védelmi rendszerek új eleme lehet."

1. "Reprezentatív szakmai felmérés adatai alapján műszaki követelményrendszert alkotam meg, amely kritérium-rendszer a prototípus UAV/UAS rendszer tervezésekor jól használható"

2. "Megalkottam egy multirotoros UAV-ra épülő, merőben új felfogást tükröző biztonsági rendszer új alrendszerének (Night Watchbird UAV System) koncepcióját, amely alkalmas nagy területen elhelyezkedő polgári-, és katonai objektumok perimetrikus védelmének segítésére, és az erők védelme hatékonyságának javítására"

Az 1. pontot el tudom fogadni önálló munkaként és tézisként, ugyanakkor a 2. pontot a koncepció vázlatossága és a felmerült kérdések miatt inkább csak érdekességként kezelném. Ennek kidolgozása során a nemzetközi irodalom áttekintését is hiányolom.

## II. A **TII** tézist:

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

annak ellenére el tudom fogadni tézisként, hogy ezek a turbulencia modellek már 2006 előtt bekerültek a Matlab Aerospace Blocksetbe. Ugyanakkor szükséges lehet ezeknek a Matlabtól független implementálása, melyre szakirodalmi példát is találtam.

## III. A **TIII** tézis 4 pontból áll:

"UAV aeroelasztikus mozgásának modellezése során bebizonyítottam, hogy:"

1. "a rugalmas deformációk matematikai modellje hozzáadódik a merev légi jármű (UAV) térbeli mozgásának matematikai modelljéhez, más szóval az aeroelasztikus UAV modellek, mint additív paraméterbizonytalanságok viselkednek "

2. "az UAV törzsének lengésképe kiemelkedő fontosságú a fedélzeti érzékelők, mint például a szögsebesség-érzékelők, és a gyorsulásmérők beépítési helyének meghatározása során "

3. "az aeroelasztikus légi járművek valós mozgásdinamikája jól használható a légi járművek automatikus repülésszabályozó rendszerei dinamikus szabályozóinak számítógépes tervezése során"

4. "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 állapotteres rendszermodell, vagy az átviteli függvény úgy zavarásmentes, mint zajos alakban"

Az 1-3 pontokat el tudom fogadni tézisként figyelembe véve, hogy a 3. pontra a 4.47-TIII számmal hivatkozott saját cikkben mutat példát (a dolgozatban sajnos nem). Ugyanakkor a 4. pontot nem tudom elfogadni, mivel túlzottan általános és nem veszi figyelembe hogy léteznek módszerek, melyek bemenet-kimenet adatokból a modell struktúrával együtt végeznek identifikációt.

IV. A TIV tézis bevezető állításból és 2 pontból áll:

"Bebizonyítottam, hogy az UAV/UAS rendszerek típus-, és légialkalmasságának tanúsítása egyaránt szolgálja úgy a tervezők, a gyártók, mint az üzemeltetők érdekeit is, és lényeges mértékben javítja az UAV/UAS rendszerek repülésbiztonságát"

1. "az UAV/UAS rendszerek típus-, és légialkalmassági tanúsításához elengedhetetlenül szükséges általános követelményrendszert dolgoztam ki: alapvető fogalmakat és definíciókat vezettem be az UAV/UAS rendszerek típus-, és légialkalmasságának mérésére, valamint azonosítottam az UAV/UAS rendszerek típus-, és légialkalmasságának tanúsításához szükséges repülési paraméterek jellemzőit"

2. "az UAV/UAS rendszerek fedélzeti automatikus repülésszabályozó rendszere típus-, és légialkalmassági vizsgálatához követelményrendszert dolgoztam ki, amely lehetővé teszi az UAV hosszirányú, és az oldalirányú irányítási csatornáinak vizsgálatát, és megfelelési tanúsítását. A számítógépes szimulációkhoz megfelelő MATLAB környezetet alakítottam ki"

Sajnos egyiket se tudom elfogadni, a következők miatt: Egyrészt követelményrendszerként olyan általános szabályozástechnikai fogalmakat és követelményeket sorol fel, melyek közismertek, és bármely rendszerre tervezett szabályzó tesztelése során vizsgálni kell őket, így nem köthetők specifikusan se a légieszközhöz, se az UAV-khoz. Másrészt a teljes téma felépítése során csak a publikált szabványokra és hivatalos útmutatókra támaszkodik, nem veszi figyelembe a témához kapcsolódó nemzetközi szakirodalmat, melynek első általam fellelt forrásai 2002-2003-ra datálódnak (van 2008, 2011 és 2012-ben már könyv is a témában), míg a szerző 2013-2015 között publikált ezen a területen.

V. A TV tézis bevezető állításból és 6 pontból áll:

"Szakirodalmi kutatásokra alapozva megállapítottam, hogy 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"

1. "optimális PID-szabályozót terveztem, illetve a pólus allokáció elvére épülő szabályozótervezést hajtottam végre a Trainer-60 SUAV identifikált modelljein"

2. "az LQR tervezési módszer segítségével optimális szabályozót terveztem a Trainer-60 SUAV részére. Igazoltam a módszer alkalmazhatóságát, bebizonyítottam a módszer alkalmazásának előnyeit, és vizsgáltam az alkalmazásának korlátait is "

3. "a hagyományos, egyszerű LQG tervezési módszer segítségével optimális szabályozót terveztem a Trainer-60 SUAV részére. Bebizonyítottam, hogy az LQG módszer jól alkalmazható a sztochasztikus külső zavarások és belső zajok jelenléte mellett, igazoltam a módszer alkalmazásának előnyeit, és vizsgáltam az alkalmazásának korlátait is"

4. "elvégeztem a Trainer-60 SUAV robotpilótájának előzetes tervezését a  $H_2$  és  $H_\infty$  kritérium szerint is. Igazoltam e módszerek alkalmazhatóságát, és bebizonyítottam az egyes módszerek alkalmazásának előnyeit, és vizsgáltam az alkalmazásuk korlátait is. Megállapítottam, hogy az alkalmazott tervezési eljárások segítségével a zárt szabályozási rendszerek előírt minőségi jellemzői biztosíthatóak. A zárt repülésszabályozó rendszerek robusztuságának vizsgálatára a zárt rendszerek  $S(s)$  és a  $T(s)$  eredő átviteli függvényeit használtam"

5. "csúszóhorizontú MPC szabályozások elméleti háttérét foglaltam össze, és igazoltam, 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"

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

ezek közül az 1-5 pontokat el tudom fogadni abban az esetben, ha a Szerzőhöz intézett kapcsolódó kérdéseimre részletes és kielégítő válaszokat kapok. A 6. pontot nem tudom elfogadni tézisként annak fényében, hogy egyrészt a Matlab rengeteg beépített függvényvel rendelkezik, amikkel a tervezések és elemzések elvégezhetők, másrészt mindenki fejleszt saját kódokat a teszteléshez.

VI. A TVI tézis bevezető állításból és 4 pontból áll:

"Szakirodalmi kutatások és saját tudományos kutatómunkám eredményeként megállapítottam, hogy a holtidő matematikai modellezése elengedhetetlen, főleg erre érzékeny irányítási rendszerekben. A holtidő lineáris közelítésére a Padé-approximáció módszerét alkalmaztam."

1. "számításokkal és számítógépes szimulációkkal bebizonyítottam, hogy megfelelő pontosságú (2% hiba) közelítés  $n=5$ , és ettől magasabb rendszámok esetén várható. A közelítés felső rendszáma  $n=69$ , amikor még nem lehető fel instabilitás a közelítő holtidős modellek viselkedésében"

2. "szakirodalmi kutatások alapján megállapítottam, hogy az UAV kezelők (operátorok) tevékenységének modellezésére számos modell ismert, és alkalmazott. Elvégeztem az egyes matematikai modellek vizsgálatát, meghatároztam a rendszermodellek jellemzőit, amelyek befolyásolják a zárt szabályozási rendszerek stabilitását"

3. "Az UAV kezelők PD-TD modelljét alapul véve, meghatároztam az UAV operátor  $\tau$  holtidejének, a  $K_p$  erősítésének, és a  $T_p$  predikciós időállandójának kritikus értékeit, amelyek destabilizálják a zárt UAV PiL szabályozási rendszer viselkedését"

4. "A matematikai és az irányításelméleti feladatok megoldására saját MATLAB függvénykönyvtárat hoztam létre"

Az elsőt rögtön el tudom fogadni eredményként, a másodikat és harmadikat csak akkor, ha a Szerzőnek feltett kérdéseimre részletes és kielégítő válaszokat kapok. A negyediket ugyanolyan okokból nem tudom elfogadni, mint a TV/6 pontot.

A teljes művet és a Szerző munkásságát - különös tekintettel az általa készített nagyszámú oktatási anyagra és tankönyvre - figyelembe véve javaslom Szabolcsi Róbert értekezésének nyilvános vitára bocsátását.

## 1. A Szerző által megválaszolendő kérdések

- A 99. oldalon más minőségi jellemzők szerepelnek mint az előtte, vagy utána való felsorolásokban. Mi ennek az oka?

- Mi az oka, hogy a 6. fejezet egy külön egység, nem pedig egyszerűen a 7. fejezet bevezetése?
- A lineáris rendszertulajdonságot figyelembe véve, szükség van-e a 7.3, 7.11, 7.17 és 7.18 ábrák (b) részeire?
- Kérem a 148-149 oldalakon felsorolt IE, IAE, ITAE, ISE hibajelek matematikai formulával való megadását is!
- A (8.55) egyenletben a villamos szervó berendezés modelljéről azt állítja a Szerző, hogy ismeretes, de honnan? Mi a modell forrása?
- A Night Watchbird koncepció egy multirotoros drónra épül, ugyanakkor az egész dolgozat végig merevszárnyú eszköz(ök)ről szól. Mi ennek az oka?
- 31. oldal 23. pont: "végül, az emisszió megfelelő szintre történő csökkentésével." itt zaj, vagy más emisszióra gondol?
- 32. oldal: "Az illegális behatolás azonosításában segíthet, hogy a behatoló maga is tudja, hogy normasértő módon jár el, és vélelmezhetően olyan stresszes állapotban tevékenykedik, amelyet adott esetben jól azonosíthatunk is a pulzusszám, a vérnyomás, test hőmérséklete, a bőr kipárolgása és egyéb mérhető biometrikus adatok segítségével." ezeket a jellemzőket hogyan lehetséges a levegőből a Night Watchbird drón segítségével mérni, illetve melyek mérése lehetséges? Szintén itt: "Ebben az esetben a gyanús személyek előzetes azonosítása után, szükség esetén egyéb módszer is használható, például személyes beszélgetés és kikérdezés" ez a levegőből hogyan lehetséges?
- 37. oldal: "Tekintettel ezen egyszerűsítő feltételre, a merev szerkezetű UAVt később anyagi ponttal helyettesítjük, amely a háromdimenziós térben összetett (egyenes vonalú, és forgó) mozgást végez." anyagi pont esetében hogyan jellemezhető a forgómozgás?
- A (4.2) egyenlet után a (4.3) egyenletből eltűnt az  $R_0$  tag, mi ennek az oka?
- Hogyan változik a (4.5) egyenlet szélzavarás esetén?
- A (4.39-4.41) egyenletekből ha a  $qr$  és  $pr$  másodrendűen kicsiny tagok elhagyhatók, akkor mi indokolja a további másodrendű tagok (4.42-4.44) egyenletekben hagyását?
- A (4.48-4.50) és (4.50-4.52) rendszerek elírásokat tartalmaznak, kérem a javított egyenletek megadását!
- A (4.57) egyenlet utolsó oszlopa alapján a föld  $\rightarrow$  test transzformációt tartalmazza, ennek fényében kérem a mátrix szorzási sorrend és a részletesen kifejtett elemek átgondolását és javítását!
- (4.83-4.85) elég sok elírást tartalmaz, kérem a javított formában való megadását!
- A (4.86) egyenlet  $\theta_0 = 0$  állítása mennyire általánosan igaz a repülőgépekre?
- A (4.87) egyenletnél csúszásmentes fordulóra gondol? Ha igen, akkor az egy szimmetrikus manőver?

- A (4.159-4.165) egyenletek inercia kombinációs tagjai nekem másképpen adódnak és a szakirodalomban (Beard, R. W. & McLain, T.W.: Small Unmanned Aircraft. Princeton University Press, Princeton and Oxford, ISBN 978-0-691-14921-9, 2012) se láttam ezt a megoldást. Így kérem a forrás megadását, vagy az egyenletek felülvizsgálatát!
- A (4.201) egyenlet tartalmazza  $g$ -t míg a (4.197) nem, mi ennek az oka? A (4.64) egyenlettel összevetve  $g$  előjele melyikben helyes?
- Mi volt a célja a (4.232) egyenletben az előző (4.218) egyenlethez képest csupán elem-sorrend cserét tartalmazó állapotvektor felírásának? Illetve (4.232) figyelembe vételével kérem, hogy értékelje (4.233) helyességét!
- A szélzavarás 4.4 ábrán publikált felépülési idejét figyelembe véve reális veszély-e, hogy a UAV sebesség szabályzója ezt nem képes kompenzálni? Különös tekintettel a szabályzó tervezéseknél alkalmazott minőségi követelményekre?
- A 4.13 ábra kapcsán a kérdésem, hogy a repülőgép törzsnek miért csak a függőleges irányú lengését kell vizsgálni? A keresztirányú lengésekkel nem lehet probléma? A (4.323-4.325) közelítések (karcsú, vékony rúd) repülőgép törzsre miért / milyen esetben (mutas-son példa konstrukciót) igazak? Alapvetően a repülőgép szárny helyett miért érdemes a törzset vizsgálni?
- A (4.312) egyenletben a két szög összegéből hogyan lesz függőleges elmozdulás?
- A (4.365) egyenletben feltüntetett egyenletes erőterhelés a repülőgép törzsre mennyire igaz? A szárny és vezérsík befogások nem befolyásolják?
- A 94. oldalon a *túlszabályzás és függvény csúcsideje* minőségi jellemzőkre milyen más elnevezést tud mondani?
- Az (5.7) és (5.8) egyenletekben  $1/T_s$  és  $1/T_r$  az átviteli függvény milyen paraméterei?
- 98. oldal: "E minőségi jellemzők a klasszikus szöghelyzet stabilizáló robotpilóta üzem-módokon alkalmasak a repülésszabályozás minőségének megítélésére." Más üzemmódo-kon miért nem? Ott milyen minőségi jellemzőket kellene alkalmazni?
- Kérem, hogy vezesse le az (5.17) átviteli függvényt (5.15) és megfelelő kontroller struk-túra figyelembe vételével, kapcsolatot teremtve  $K_{cl}$ ,  $T_{Rcl}$  és  $K_\phi$ ,  $T_R$  között! A hipotetikus UAV modell helyett helyettesítse be a Trainer-60 Boomerang UAV adatait és úgy jelenítse meg és jellemezze az 5.1, 5.2 és 5.3 ábrákon bemutatott viselkedést!
- Az (5.19-5.21) átviteli függvények itt teljesen azonosak. Hogyan alakulnak ezek a Trainer-60 Boomerang UAV paramétereit behelyettesítve?
- Az (5.26) egyenlet és az 5.4, 5.5 és 5.6 ábrák kapcsán ismét kérem a hipotetikus UAV helyett a Trainer-60 Boomerang UAV paramétereinek használatát!
- 105. oldal: "Megemlítjük, hogy ellentétben a személyzet által a fedélzetről irányított lé-gijárművekkel, ahol a phugoid pályalengésekkel nem számolnak, mert annak kialakulá-sát csillapító automata megelőzi, az UAVk esetén, véleményem szerint e mozgásfajttával számolni kell a repülésszabályozás által esetlegesen nem kezelt folyamatok miatt." Van ennek az állításnak repülési adatokon, vagy szakirodalmon alapuló alátámasztása? Mi in-dokolja, hogy az (5.29) és (5.30) egyenletekben mégis csak a rövid periódusú mozgást veszi figyelembe?

- Az (5.32) egyenlet és az 5.7, 5.8 és 5.9 ábrák kapcsán ismét kérem a hipotetikus UAV helyett a Trainer-60 Boomerang UAV paramétereinek használatát!
  - A 118. oldalon az 5), 6), 7) és 8) pontokhoz kapcsolódva kérem, hogy tegye meg a  $\mathcal{H}_2$ ,  $\mathcal{H}_\infty$ ,  $\mu$  és MPC tervezési módszerek pár mondatos jellemzését, előnyeik és hátrányaik kiemelését ahogy a többi módszernél is megtette!
  - A (7.1) és a következő modellekben az állapotok és bemenetek mértékegységei mik?
  - A kereszt dinamikából hogyan lehet (7.2) a rövidperiodikus mozgás? Milyen speciális mozgásformák vannak a merevszárnyú repülőgép kereszt dinamikájában?
  - A (7.2) ábra egy kaszkád P szabályozást ábrázol. Miért volt szükség az erősítések LQR módszerrel való tervezésére? Milyen más egyszerűbb módszerrel lehetne az erősítéseket meghatározni? A (7.3)-ban adott LQ súlyok kielégítik a (7.96) alatt megadott feltételeket? A 7.3 ábrán publikált eredmények rendben vannak, de kérem melléjük a csűrőkormánykitérés ábrázolását és a Trainer-60 UAV kitérés korlátai szerint való értékelését! A 7.5 ábra szerint a fázis tartalék majdnem 80 fok lett. Ez lehetővé teszi a szabályzó gyorsítását. Ha a megengedett csűrőkormánykitérés is lehetővé teszi, akkor kérem egy gyorsított szabályzó tervezését, ami csupán 40-50 fok fázis tartalékot hagy a rendszerben!
  - A 7.5 (és 7.9) ábrán a felnyitott hurok Bode diagramja a külső hurokra vonatkozik? Azaz a  $K_S$  erősítést már tartalmazza? A (7.8) egyenletben a  $K_c$  erősítés megválasztása mi alapján történt? És mi indokolja, hogy az integráló tag  $T_I$  időállandója 10s legyen? Milyen megfontolások vezettek ide? Hogyan lehetne gyorsítani a szabályzást? Mi indokolja a D tag külön hozzáadását a bedöntési szög szabályzóhoz (7.11) tekintettel a 7.2 ábrán a bedöntési szögsebességre alkalmazott  $K_S$  tagra, ami a bedöntési szögre vonatkozóan D tagként viselkedik? Különös tekintettel arra, hogy bevett gyakorlat a szögsebességek D tagként való visszacsatolása a szög szabályzóban (lásd pl. Beard, R. W. - McLain, T.W.: Small Unmanned Aircraft. Princeton University Press, Princeton and Oxford, ISBN 978-0-691-14921-9, 2012.) elkerülve a deriválásból eredő Szerző által is említett problémákat. A (7.14) felsorolásban megadott paraméterek milyen módszerrel kerültek felvételre? Mi indokolja a 200-as erősítés alkalmazását az addigi nagyjából 3-as  $K_c$  erősítés helyett? A 7.17 és 7.18 ábrák mind azt támasztják alá, hogy a rendszer gyors, de elfogadhatatlanul túlvezérelt, ráadásul a zavarelnyomás tranziense lassab lett (bár a zavarás hatására való kitérés jóval kisebb) ahogy a 7.21 ábra mutatja. Ráadásul a 7.19 ábra szerint a fázis tartalék 17 fokra csökkent, ami már tényleg túl alacsony egy bizonytalan rendszer esetén. Kérem a csűrőkormánykitéréseket is ábrázolni a különféle szabályzókkal és összevetni a Trainer-60 UAV korlátaival.
- Összességében a 7.2 ábrán vázolt szabályzás újratervezését kérem a  $K_S$ , mint D tag és a PI szabályzó (7.8) újrarahangolásával, majd a jelkövetés, a zavarelnyomás, a kormányfelület kitérések és a fázis- és erősítési tartalék elemzésével!
- A 7.22 ábrán feltüntetett állapot visszacsatolás mikor lehet referenciajel követő? Mi a (7.46-7.49) egyenletek megoldási sorrendje?  $\delta \xi$ -től függ, az meg  $\delta$ -tól. Ráadásul (7.46)-ba (7.47)-et behelyettesítve  $\sin \delta$  adódik nem tangens. A (7.55) és (7.56) egyenletek azt mutatják, hogy a tervezési módszer a stabil póluspár helyben hagyása és a 0 pólus elmozdítása negatív irányba. A kérdés, hogy az integrátorhoz tartozó bólintási szög dinamikát miért kell gyorsabbra venni a szögsebesség-sebesség dinamikánál? Az ebből adódó túl szabályzást aztán a Szerző is látja a (7.25) ábrán: "A 7.25. ábrán jól látható, hogy az

egységnyi bólintó szög bemenetre adott rendszerválasz nagy túlszabályozással működik, ami még az UAVk esetében sem megengedett." Ugyanakkor nem történik meg a rendszer újrahangolása és a kormánykitérések elemzése se. Így kérem az újrahangolást kisebb bólintási szög túllövés elérésig és a Trainer-60 UAV kitérés korlátainak megfelelő magassági kormánykitérés maximumok betartásáig (jó eséllyel a rendszer ezeket most nem tartja be). Ezen túl mutasson rá, hogy az egyszerű állapot visszacsatolás ellenére miért követi a rendszer mégis a bólintási szög referenciát!

- (7.58) egyenlethez kapcsolódóan mit tud mondani az LQR módszer referencia követéséről? Ugyanerre a rendszerre ugyanennek az LQ erősítésnek a tervezését már elvégezte (7.4)-ben. Mi az oka, hogy most más súlyozást használt és fordított előjellel adódtak az erősítés értékek (7.90)? (7.92) aztán már a (7.4)-ben adott erősítéseket adja, csak fordított előjellel. Mi az előjel fordítás oka? És (7.91) hogyan teljesíti a (7.96) alatt megadott feltételeket? A 7.28 és 7.29 ábrák kapcsán is szükséges a kormánykitérések elemzése, hogy a Trainer-60 UAV korlátait betartják-e? Tehát kérem ennek elvégzését, bár érdekes módon a -31-es pólustól elvárt nagyon gyors tranzienst az ábrákon nem látható.
- Az LQG tervezés meg tudja oldani a determinisztikus zavarások kompenzálását is? A 7.32 ábrán felrajzolt rendszerben mit tud mondani az  $x_{ref}$  referencia követéséről? Fogja követni a rendszer? Milyen feltételekkel? Mekkora hibával? A (7.106)-ban megadott súlyok szélsőségesen extrém értékeket képviselnek, hogyan határozta meg őket? A 7.34 ábra szerint a  $w$  sebesség gyorsan és elfogadható túllendüléssel áll be, de hogyan viselkedik eközben a  $q$  szögsebesség és a magassági kormány? Utóbbi betartja a Trainer-60 UAV rendszerhatárait? Vizsgálja meg, hogy melyik dinamikához (kontroller, vagy Kálmán szűrő) tartoznak a gyors  $-296$  és  $-1260$  és a lassú  $-10,4 \pm 7i$  pólusok! Eleget tesz így a rendszer a követelménynek, hogy a szűrő (állapotbecslő) gyorsabb legyen, mint a szabályzó?
- (7.111) alatt említésre kerül az ismeretlen eredetű parancsjel. Ezt hogyan definiálhatjuk? (7.121) felett eltávolítja a mérési zajokat a rendszerből. Miért? Azokkal együtt nem megoldható a  $\mathcal{H}_2$  tervezés? (7.119) SISO, vagy MIMO rendszerre vonatkozik? Ezt figyelembe véve pontos-e a megadott formula? (7.125) figyelembe vételével a  $v_1$  zavarás tulajdonképpen a rendszer inputjára hat. Miért nem direktben oda lett felvéve ez a változó? A zárt hurok megtervezése után még mindig korrekt így a bemeneti zavarás hatásának modellezése? (7.129) egyenlethez és 7.38 ábrához jutva már minden zavarás eltűnik a rendszerből, ráadásul (7.131) már csak egy sima 1 tárolós, arányos átviteli függvény. Mi indokolja ezt és miért szükséges ilyen egyszerű rendszerre  $\mathcal{H}_2$  tervezés alkalmazása? Miért nem elegendő a 7.1 részben bemutatott PI tervezés (ahol ráadásul figyelembe vette a determinisztikus zavarás hatását)? (7.133) súlyozó mátrixait miért ilyen módon (milyen megfontolások mentén) választotta meg? A 7.38 ábra és a felírt egyenletek fényében hogyan értelmezendő a  $T_{z_1} w_1$  átviteli függvény? A 7.39 ábra mellé kérem a csűrőkormány kitérések megjelenítését is!
- (7.144) biztos, hogy a T átviteli függvény mátrix sajátértékét maximálja? (7.147-7.150) esetében megint az a kérdés, hogy SISO, vagy MIMO reprezentációról van-e szó és ezt figyelembe véve pontos-e a megadott formula? 171. oldal: "robustus lesz, amely képes minimálni, vagy teljesen kiszűrni a mérési zajok zárt szabályozásra gyakorolt hatását." Mi a kapcsolat a robosztusság és a zajszűrés között? A 7.40 ábra milyen módosítása szükséges egy robustus szabályzó tervezéséhez? A 7.42 ábra és a (7.152) súlyozó függvények teljesen azonosak a 7.38 ábrával és (7.133) súlyozó függvényekkel. Mi ennek az oka? A



másféle normára való szabályzó tervezés miatt nem teszi szükségessé a súlyozó függvények módosítását? A 7.42 ábra mellé kérem a csűrőkormánykitérés megjelenítését és a Trainer-60 határai szempontjából való értékelését is!

- A 7.45 ábrán mit jelölnek a zöld-sárga-piros színek, és miért  $x$ -el jelölte a jövőbeli kimenetet? (7.205) egy állapot dinamikai egyenlet, ahol  $Y_d$  a  $d$  zavarás állapot deriváltakra való hatása. Ugyanakkor (7.206)-ban  $Y_d(s)$  átviteli függvény szerepel. Mi a kapcsolat a két felírás között? (7.207) szerint a rendszer időállandója  $T = 0.05s$  ennek figyelembe vételével (tranziens felfutás ideje) mennyire megfelelő a  $\Delta t = 0.1s$  mintavételi idő alkalmazása? Mi a kapcsolat a  $\Delta t = 0.1s$  mintavételi idő és a 7.47 és 7.48 ábrákon szemmel láthatóan  $1s$ -onként változó jelszintek között? Az elért  $3-4s$  beállási idő indokoltá teszi-e az MPC módszer alkalmazását a sima PI szabályzóhoz képest, mely ugyanúgy képes volt a zavarást kompenzálni és gyorsabb is volt ennél (7.1 rész)? Az alkalmazási példában nem látom nyomát a [7.74] irodalom alapján ismertetett Laguerre bázist használó módszernek. Hol érhető tetten az alkalmazása, illetve ha nem került alkalmazásra annak mi az oka?
- Az UAV operátor modellek mindegyike a szakirodalomból van, vagy van ami kifejezetten saját fejlesztés? (8.47)-ben az  $n=5$  rendű Padé approximáció legjobbnak ítéletét követően a szerző visszatér elsőrendű közelítésre. Mi ennek az oka? A 8.10, 8.11 és 8.12 ábrákon kérem a közelített holtidős rendszer videlkedésének feltüntetését is, hogy jobban látszódjon a közelítések minősége! A 8.14 és 8.16 ábrák alapján biztosan a PD-TD operátor modell a legjobb? 8.14 alatt még P-TD van legjobbként kiemelve, de 8.16 alatt már a PD-TD szerepel és ezt viszi tovább a következő alfejezetben. Sőt, a TVI/3 tézispontot is ez alapján mondja ki. Ugyanakkor ennek a tagnak a 8.16 ábra szerint elfogadhatatlanul nagy a túllövése. Miért ezt választotta mégis?
- Az operátor modell UAV szabályzásban való alkalmazásához kérem, hogy hipotetikus UAV helyett a Trainer-60 UAV hosszdinamikáját használja! Illetve kérem, hogy nézze meg keresztdinamikára is a kiadódó eredményeket, hogy milyen különbségek adódnak a kritikus holtidők, erősítések és predikciós időállandók között?
- Végül sajnálatos, hogy hol kereszt- (PID, LQR,  $\mathcal{H}_2$ ,  $\mathcal{H}_\infty$ ) hol pedig hosszdinamikára mutatta be a tervezéseket (ÁVCS, LQG) így az összes módszer végső összevetésének és összegző értékelésének a lehetősége elmaradt. A feltett kérdések sokaságára való tekintettel ennek pótlását már nem kérem a Szerzőtől.

## 2. Szerkesztési pontatlanságok

- A 18. oldalon a Small UAV kategória hasznos terhelése először  $1.5-2kg$  majd  $10-20kg$ , a Medium UAV  $10-200kg$  hasznos terhelése fényében utóbbi elírás lehet.
- A 4.2 ábrán csak a test koordináta rendszer szerepel, az aerodinamikai nem!
- (4.4) egyenlet utolsó tagjában az  $m$  szorzó lemaradt
- A (4.69) első tagjában  $pu$  helyett  $\Delta p$  tag kellene
- A (4.77-4.82) egyenletrendszerben a  $\Delta$  jelek lemaradtak a jobb oldalon és a rendszer pár egyéb pontatlanságot is tartalmaz

- A (4.159) egyenlet a (4.154-4.158) rendszerre vonatkozik, mely még  $\nu$  szerinti deriváltakat tartalmaz, nem  $\beta$  szerintieket
- (4.214)-ben  $A$  nem állapot vektor, hanem állapot mátrix (vagy állapot átmeneti mátrix)
- (4.219) egyenlet kapcsán jó lett volna kitérni a gázkar hatás elhagyásának okára
- A (4.223) egyenletben  $M_{\delta_E}$  helyett szerintem helyesen  $Z_{\delta_E}$
- (4.231) az UAV bemeneti vektoraként van hivatkozva, míg ez az állapottér bemeneti mátrixa
- A (4.237) egyenlet első felében  $q$  lemaradt
- (4.267)-ben az  $A$  mátrix 2. és 3. sorában  $\nu$  alsó index kellene a  $\beta$  helyett
- Találtam irodalmi hivatkozásokat elírt névvel és kiadóval.
- Az 5.4 és 5.5 ábrák függőleges tengelyén tévesen  $p(t)$  érték szerepel  $r(t)$  helyett
- A 108. oldalon a minőségi jellemzők részletes definíciója később szerepel, első felsorolásukkor a 94. oldalon kellett volna szerepeltetni
- (7.152)-ben  $W_1$  és  $W_2$  súlyozó függvények szerepelnek, míg előtte a 7.41 ábrán  $W_e$ ,  $W_u$  és  $W_y$
- A 8.6 - 8.9 ábrák alatt jó lett volna feltüntetni a később használt P-TD - PD-2O-TD jelöléseket a könnyebb beazonosíthatóság érdekében.
- A tézisek ismertetésekor van pár saját cikk, amik véletlenül kétszer vannak hivatkozva teljesen azonos adatokkal.

2024.10.02.

Bauer Péter