

HIBADETEKTÁLÓ SZŰRŐ TERVEZÉS
ÁTKONFIGURÁLHATÓ IRÁNYÍTÓ RENDSZEREK
SZÁMÁRA

TÉZISEK

SZÁSZI ISTVÁN

TÉMAVEZETŐ:
DR. BOKOR JÓZSEF

BUDAPEST MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
BUDAPEST
2003. NOVEMBER

Bevezetés és motiváció

A modern technológiák alkalmazása magas komplexitású dinamikus rendszereket eredményez. Tekintettel a megnövekedett strukturális és működésbeli komplexitására, a biztonsági szempontból kritikus folyamatok meghibásodása emberéleteket veszélyeztethet, továbbá káros hatással lehet a környezetre. Az ilyen biztonsági szempontból kritikus folyamatok nagy-megbízhatóságú irányító rendszerek alkalmazását követelik meg. A megbízhatóság, a rendelkezésreállítás és egyéb biztonsági követelmények szükségessé teszik a műszaki folyamat teljes megfigyelését, beleértve az érzékelők, beavatkozó szervek valamint az irányító rendszer elemeinek figyelését nyílt, illetve zárt-hurkú működés során. Biztonsági szempontból kritikus folyamatnak tekinthető a légi közlekedés, az ipari nukleáris és vegyi folyamatok valamint a járműipar, ahol a meghibásodásból származó emberi és környezeti károk jelentősek lehetnek. Azon alkalmazásoknál, ahol az irányító rendszer tervezésével kapcsolatban a megbízhatóság az egyik elsődleges követelmény, a működési biztonság és rendelkezésreállítás növelésének fontos eszköze, a rendszerekben fellépő különböző típusú hibák detektálása, azonosítása, továbbá azok hatását semlegesíteni, vagy gyengíteni képes módszerek alkalmazása.

A dolgozat célkitűzése olyan irányítási módszertan kidolgozása, amely biztosítja a fenti feladat megoldását. A nagy-megbízhatóságú irányító rendszerek tervezése és analízise a robusztus többváltozós irányítások és a hibadetektálás módszertanának alkalmazását igényli. Ezek alapvetően egy robusztus szabályozóból, és egy hibadetektáló szűrőből épülnek fel, amelyek a

hibák korai detektálásával, valamint az irányítás átkonfigurálásával biztosítják a biztonságilag kritikus folyamat minőségi követelményeinek megfelelő szinten tartását.

A modell alapú robusztus szabályozó tervezés célja, a szabályozott rendszer stabilitásának, valamint az előre specifikált minőségi követelményeinek biztosítása a modell bizonytalanságokkal szemben. Valós működési körülmények között a rendszer paraméterei valamint a rendszer munkapontja megváltozhat, és mindez ronthatja a szabályozott rendszer performanciáját. Ezért a szabályozót robusztussá kell tenni abból a célból, hogy az valós körülmények között is biztosítsa a szabályozott rendszer minőségi követelményeit. Tekintve, hogy a rendszerek nemlineáris komponenseket tartalmazhatnak, fontos kérdés ezek kezelése. Az utóbbi évek egyik kiemelkedő eredménye a nemlineáris rendszerek lineáris paraméter-változós modell osztállyal történő leírása. A módszer előnye, hogy a rendszer nemlineáris karakterisztikáját reprezentáló paraméterek felhasználásával, a lineáris szabályozó valamint detektáló szűrő tervezés során jól ismert eredmények alkalmazása válik lehetővé nemlineáris rendszerekre.

A szabályozandó rendszerben olyan hibák is felléphetnek, amelyek a rendszer nem kielégítő működéshez vezetnek, azaz a szabályozott rendszer elveszíti stabilitását, vagy romlik a performanciája. Ahhoz, hogy a szabályozó képes legyen az irányított rendszer stabilitását és performanciáját biztosítani, szükségeszerű a rendszerben fellépő hibák detektálása. A hibadetektálás elsődleges célja olyan módszertan biztosítása, amely detektálja és azonosítja a rendszerben lévő komponensek hibáit, megelőzve ezzel a rendszer olyan nemkívánatos állapotba kerülését, amely adott esetben katasztrófához vezethet. Lényeges megemlíteni, hogy a hibák detektálását általában a szabályozott rendszer működése során kell megoldani, amely a hibadetektálás módszertanának zárt hurokra való kiterjesztését igényli.

A nagy-megbízhatóságú irányító rendszerek tervezése a robusztus irányítás és a hibadetektálás módszertanán alapul. A tradicionális nagy-megbízhatóságú rendszerek tervezése során az irányítás és a hibadetektáló szűrő

tervezését egymástól függetlenül végezték el. Azonban zárt hurkban történő hibadiagnosztika során az irányítás és a hibadetektáló szűrő tervezése között összhangot kell biztosítani. A hibatűrő rendszerek tervezésének egyik lehetséges módszere a szabályozó tervezésének túlbecslése olyan módon, hogy az képes legyen a hibák hatásait kompenzálni és a minőségi követelményeket kielégíteni. Ez a tervezési módszer konzervatív irányítási rendszer kialakítását eredményezheti és a szabályzott rendszer üzemeltetése nem optimális a szabályozó kihasználatlan tartalékai miatt. Egy másik lehetséges megoldása a nagy-megbízhatóságú irányító rendszerek tervezésének, az átkonfigurálható szabályozók alkalmazása, amelyek a hiba megjelenésének detektálása során automatikusan átkapcsolnak egy olyan konfigurációra, amely a detektált hiba hatásának kompenzálására van felkészítve. Az átkonfigurálható szabályozók tervezése éppen a tervezés alappilléreit jelentő robusztus irányítások valamint hibadetektálás módszertanának utóbbi években elért eredményeire támaszkodik, amely manapság nagy intenzitással kutatott terület.

Az elmúlt években végzett kutatásaim a fenti feladatok megoldására fókuszáltak, és a dolgozat felépítése is ezt a gondolatmenetet követi. A dolgozat célja az átkonfigurálható szabályozó tervezés módszertanának kidolgozása, valamint az ehhez szükséges építőelemek, így a robusztus szabályozó tervezés és a hibadiagnosztika megoldása. Az elmúlt években végzett kutatásaim eredményeit járműdinamikai modelleken illusztráltam, amelyek a bevezetőben már említett biztonsági szempontból kritikus rendszereknek tekinthetők, így rendkívül dinamikusan fejlődőnek. Kutatásaim közötti járművekre történő fókuszálását a Knorr-Bremse-nél felvetett problémák, a repülőgép irányító rendszerekkel kapcsolatos kutatásaimat pedig a University of Minnesota egyetemen felvetett megoldatlan kérdések motiválták. Ezen kutatási területeken van leginkább létjogosultsága a korszerű rendszer és irányításelméleti eredmények alkalmazásának.

Elvégzett kutatások áttekintése

Ebben a fejezetben röviden áttekintem a kutatásom során alkalmazott módszereket.

Többváltozós rendszerek robusztus irányítása

Dolgozatom első része olyan robusztus szabályozó tervezési módszertannal foglalkozik, ahol a strukturált és strukturálatlan bizonytalanságok együttes figyelembevételére nyílik lehetőség. A fejezetben bemutatom a strukturált valamint strukturálatlan bizonytalanságok modellezését. Strukturálnak tekinthető a járműdinamikai rendszerek modellezésében gyakran előforduló paramterikus bizonytalanság, amely esetén a paraméter pontos értéke ugyan nem ismert, azonban a bizonytalanság korlátos tartománya megbecsülhető. A paramterikus bizonytalanságra vonatkozó információ felhasználása, azaz a bizonytalansági blokk strukturálása növeli a modell pontosságát, ugyanakkor nehezíti a szabályozott rendszer analízisét és szintézisét. Az ún. normakorlátos perturbáció használata egyszerűsíti ugyan a szabályozó analízisét, azonban ez az eljárás túl konzervatív lehet. Ebből következően kompromisszum van a modell megbízhatósága és bonyolultsága között. A \mathcal{H}_∞ elmélet és a μ strukturált szinguláris érték fogalma nagymértékben megkönnyíti a rendszer robusztus stabilitásának és performanciájának vizsgálatát, valamint a szabályozó tervezését strukturált bizonytalanságok esetén, (Doyle et al. 1989, Packard & Doyle 1993).

A tradicionális robusztusság vizsgálat során, a zárt rendszer stabilitásának

és minőségi követelményeinek verifikálása a paraméterek korlátos tartományaiban való perturbálásával történik. Ez az eljárás azonban nem garantálja a legrosszabb paraméter bizonytalanság megtalálását, a robusztussági vizsgálat ugyanis, a paraméterek folytonos tartományainak csak véges számú pontjaiban történik. A strukturált szinguláris érték bevezetésével lehetőség nyílik a szabályozott rendszer robusztussági valamint minőségi vizsgálatára, a perturbált paraméterek folytonos intervallumban felvett tetszőleges értéke esetén. A μ értékével pontosan jellemezhető \mathcal{H}_∞ értelemben a rendszer robusztus stabilitása és performanciája strukturált bizonytalanságok esetén, (Young et al. 1991, Zhou & Doyle 1996).

Az értekezésemben megmutattam, hogyan lehet csökkenteni a szabályozó konzervativizmusát a strukturált bizonytalanságok figyelembe vételével. Továbbá megvizsgáltam a vegyes μ szintézis alkalmazásának hatását az átkonfigurálható irányítások tervezése kapcsán.

Hibadetektálás nyílt hurokban

A dolgozat 3. fejezete a többváltozós rendszerek modell alapú hibadiagnosztikájára helyezi a hangsúlyt. Ennek elsődleges célja, hogy detektáljuk, izoláljuk és azonosítsuk a rendszerben bekövetkező hibákat. A hibadetektálás gondolata azon a tényen alapszik, hogy a rendszerben bekövetkezett változások nem feltétlenül vonatkoznak hibás eseményekre, azonban a hibás működés rendszerint változásokat idéz elő a rendszer dinamikájában. Magába foglalja a rendszer működésének folyamatos monitorozását nyílt illetve zárt hurkú működés során, beleértve a beavatkozó és érzékelő egységek diagnosztikáját. A klasszikus hibadetektálás módszertana az ún. hardver redundancián alapszik, ahol többszörös érzékelő és beavatkozó elemek felhasználásával biztosítjuk a folyamat rendelkezésre állását. Az analitikus redundancia a biztonságilag kritikus folyamat matematikai modelljét használja. A rendelkezésre álló mérések és a folyamat matematikai modellje által reprezentált apriori információ összehasonlításával egy ún. reziduál

jelet generálunk, amely alapján dönthetünk a hibaesemény bekövetkezéséről. Az irodalomban számos módszer létezik a reziduál jel generálására, pl. parity space megközelítés, (Gertler 1998), multiple model módszer, (Boskovic & Mehra 1999), unknown input megfigyelő módszer, (Chen & Patton 1999), geometriai eljárás, (Massoumnia 1986), frekvencia tartományi közelítés, (Frank & Ding 1994). A lineáris rendszerekre kidolgozott geometria módszer Massoumnia nevéhez fűződik, (Massoumnia 1986). A geometria eljárás a (C,A) invariáns alterek alkalmazásán alapszik, amely biztosítja a hibák kölcsönös detektálásának feltételét. A geometria módszer alkalmazható az LPV hibadetektáló szűrők tervezésében is, (Balas & Bokor 2000, Balas et al. 2002). A lineáris időfüggő rendszerekre, bilineáris rendszerekre, valamint input affin nemlineáris rendszerekre kidolgozott hibadetektáló szűrők tervezési módszere az alábbi referenciákban található, (Edelmayer, Bokor, Szigeti & Keviczky 1997, Edelmayer, Bokor & Keviczky 1997, Hammouri et al. 1999, Persis & Isidori 2000). Az LTI rendszerekre kidolgozott inverziós eljárás felhasználható a hibadetektáló szűrők tervezésében, (Szigeti et al. 2001, Edelmayer et al. 2003). A szűrő kimenetei a rendszerben előforduló hibák, míg a szűrő bemenetei a rendszer kimenetei és azok deriváltjai. Ez az eljárás a hibák detektálásán és izolálásán kívül lehetővé teszi a hibák nagyságának pontos becslését.

Ebben a fejezetben bemutatom a geometriai eljáráson alapuló hibadetektáló szűrő tervezési eljárását, valamint a geometria módszer LPV rendszerekre történő kiterjesztését. Az LPV hibadetektáló szűrő tervezése a lineáris rendszerekre kidolgozott (C,A) invariáns altér algoritmus LPV rendszerekre való kiterjesztésén alapszik. Az LPV szűrő stabilitása kvadratikus értelemben a paraméter tér extrémális pontjaira megfogalmazott lineris mátrix egyenlőtlenségek megoldásával garantálható. A fejezet egy igen jelentős hozzájárulása, a nemlineáris repülőgép modellre kidolgozott LPV hibadetektáló szűrő alkalmazása.

Hibadetektálás nyílt hurokban vs. zárt hurokban

A modell alapú hibadetektálás felhasználja a folyamat matematikai modelljét, amely azonban pontosan nem ismert. Következésképpen a hibadetektáló szűrők tervezésének egyik fontos tulajdonsága a detektálás minőségi mutatói, azaz annak a lehetősége, hogy a detektáló szűrő azonnal, vagy minimális késleltetéssel detektálja a bekövetkező hibát a rendszerben lévő bizonytalanságokkal szemben. A gyakorlatban azonban nem lehetséges, hogy a detektáló szűrő érzékenységét minden határon túl növeljük. Ebből következik, hogy a szűrő érzékenysége és zajelnyomása közötti kompromisszum egy igen fontos tervezési szempont. Rendszerint a hibadetektáló szűrő tervezése a rendszer nyílt hurkú modellje alapján történik, míg a szűrőt a zárt hurokban használjuk. Kombinált szűrő és szabályozó teljeskörű analízise nominális, valamint bizonytalan zárt hurok esetén megtalálható a következő hivatkozásokban, (Niemann & Stoustrup 1997, Stoustrup & Grimble 1997).

A 4. fejezetben a hibadetektáló szűrők robusztussági analízisét végeztem el általánosított rendszerre vonatkozóan, valamint a zárt hurok hatását vizsgáltam nominális és bizonytalan rendszer esetén. Megmutattam, hogy nominális esetben, a szabályozó és a hibadetektáló szűrő tervezése szeparálhatóan elvégezhető. Kidolgoztam egy, a zárt hurok minőségi tulajdonságait, valamint a detektálás érzékenységét figyelembe vevő kompromisszumos szűrő/szabályozó tervezési eljárást, ahol a zárt kör robusztus stabilitási tartalékát, mint tervezési paramétert vettem figyelembe a tervezési problémában, biztosítva ezzel a megfogalmazott kompromisszumot. A kombinált tervezési eljárást a Boeing 747-100/200 repülőgép modell felhasználásával demonstráltam.

Hibatűrő irányító rendszer

A hibatűrő irányító rendszerekkel szembeni követelmény, hogy biztosítsák a szabályozott rendszer megbízhatóságát és rendelkezésre állását olyan esetekben is, amikor a rendszerben előforduló hibák fokozott veszélyt jelenthetnek az emberi életre vagy a környezetre. A szabályozott rendszer megnövelt biztonságát elérhetjük, egyrészt ha biztosítjuk, hogy a rendszerben nem fordulhat elő hiba, másrészt ha számolunk a potenciális hibák kockázatával, és ilyen esetekben hibatűrő irányító rendszereket alkalmazunk. A hibatűrő irányító rendszerek típusait átkonfigurálható, vagy átstrukturálható megközelítések alapján osztályozhatjuk. Az elmúlt években számos eredmény jelent meg mindkét osztályra vonatkozóan. Az átkonfigurálható szabályozók tervezése a lehetséges hibák apriori információin alapulnak, (Boskovic & Mehra 1998, Ganguli et al. 2002). A hibatűrő rendszerek egyik alternatív megközelítése az átstrukturálható szabályozók köre, ahol a szabályozót online tervezés eredményeként kapjuk meg adaptív technikák felhasználásával, (Boskovic et al. 1998, Napolitano et al. 2001).

Az 5. fejezet az átkonfigurálható irányító rendszerek LPV alapú tervezési módszertanát mutatja be. Az irányítás felhasználja a detektáló szűrő reziduál jelét, mint LPV paramétert, biztosítva ezzel a szabályozó átkonfigurálását hiba előfordulása esetén. A hibatűrő szabályozók tervezési módszertanát haszongépjárművek menetstabilizáló rendszerének tervezésén keresztül mutatam be. Az átkonfigurálható szabályozási algoritmus a jármű felfüggesztését valamint fékrendszerét használja annak érdekében, hogy megelőzze a jármű borulását. Normál működés során, a szabályozó a fékrendszert csak akkor használja, ha a jármű borulás közeli állapotba kerül. Abban az esetben, ha felfüggesztési rendszer meghibásodik a szabályozó kiterjeszti a fékrendszer működési tartományát.

Új tudományos eredmények

Kutatásaim során elért új tudományos eredményeket az alábbi tézisekben foglaltam össze.

1. Tézis (2.3 és 4.6 fejezetek). *Megvizsgáltam a modellezési paradigma kiválasztását, a szabályozás analízisének és tervezésének módszertanát az át-konfigurálható irányítások tervezésére kapcsán. Megmutattam, hogy a vegyes μ szintézis alkalmazása, azaz a strukturált és strukturálatlan bizonytalanságok tervezés során történő egyidejű figyelembevétele, jelentősen javítja a zárt szabályozási kör minőségi mutatóit. [J3, J4, J8, C15, C16, C21]*

- Megállapítottam, hogy egy lineáris időinvariáns dinamikus rendszer strukturálatlan bizonytalanságát reprezentáló $W_u(s)$ súlyfüggvény mértéke, \mathcal{H}_∞ értelemben csökkenthető a strukturált bizonytalanságok figyelembevételével.
- Kísérletek alapján megmutattam, hogy a rendszer strukturálatlan perturbációját reprezentáló $W_u(s)$ bizonytalansági súlyfüggvény \mathcal{H}_∞ normájának csökkentése, befolyásolja a zárt szabályozási kör jelkövetésének, zajelnyomásának és hiba elnyomásának minőségi mutatóit.

2. Tézis (3.4 és 3.5 fejezetek). *A (C,A) -invariáns altér algoritmus LPV rendszerekre történő kiterjesztésével megoldottam az LPV hibadetektáló szűrők tervezési problémáját, ahol a szűrő kvadratikus értelemben vett stabilitását lineáris mátrix egyenlőtlenségek megoldásával biztosítottam. [J2, C13, C14]*

- Megoldottam a különböző hibák hatásának szétcsatolását az alábbi paraméter változós nem-megfigyelhető altér algoritmus alkalmazásával:

$$\mathcal{S}_0 = \mathcal{W}^* + \text{Ker}C$$

$$\mathcal{S}_{k+1} = \mathcal{W}^* + \left(\bigcap_{i=0}^N A_i^{-1} \mathcal{S}_k \right) \cap \text{Ker}C$$

ahol a \mathcal{W}^* altér a szétcsatolandó hiba \mathcal{L} képterét tartalmazó legkisebb paraméter változós (C, A) -invariáns altér.

- Egy repülőgép modelljének felhasználásával megmutattam, hogy kvadratikusan értelemben globálisan stabil LPV hibadetektáló szűrő tervezhető, a paraméter tér extrémális pontjaiban megadott alábbi lineáris mátrix egyenlőtlenségek megoldásával:

$$(A_0(\rho) + D_1(\rho)M)^T X(\rho) + X(\rho)(A_0(\rho) + D_1(\rho)M) < 0$$

ahol $A_0(\rho)$ az $(A(\rho) + D_0(\rho)C)$ megszorítása a $\mathcal{X}/\mathcal{S}^*$ faktortéren, $D_1(\rho)$ a szűrő erősítése, M a szűrő kimeneti mátrixa és $\rho \in \mathcal{P}$ a paraméter vektor.

3. Tézis (4.3, 4.5 és 4.6 fejezetek). *Kidolgoztam egy, a zárt hurok minőségi tulajdonságait valamint a detektálás érzékenységét figyelembe vevő kompromisszumos szűrő/szabályozó tervezési eljárást, ahol a zárt kör robusztus stabilitási tartalékát, mint tervezési paramétert vettem figyelembe a tervezési problémában, biztosítva ezzel a megfogalmazott kompromisszumot. [J5, J7, C10, C13]*

- Bebizonyítottam, hogy zárt szabályozási kör alapján tervezett F_{cl} hibadetektáló szűrő $\|e_{cl}\|$ becslési hibájának normája romlik a zárt kör zajelnyomási tulajdonságainak javításával, amelyet az alábbi összefüggéssel igazoltam:

$$e_{cl} = (I - F_{cl}S_oG_v)v - F_{cl}S_oG_w w$$

ahol S_o a kimenetre vonatkoztatott érzékenységi függvény, v a hiba és w a zajbemenet.

- Általánosított P-K struktúra alapján bebizonyítottam, hogy a zárt hurok $\|M_{ed}\Delta\|_\infty$ robusztus stabilitási tartalékának növelése, csökkenti a nyílt hurok alapján tervezett, de bizonytalansággal rendelkező zárt hurokban működtetett F_{ol} detektáló szűrő $\|e_{cl}^\Delta\|$ becslési hibájának normáját, az alábbi egyenlet szerint:

$$e_{cl}^\Delta = (I - F_{ol}G_{yv})v - F_{ol}G_{yd}\Delta(I - M_{ed}\Delta)^{-1}M_{ev}v$$

ahol Δ a modell bizonytalansági struktúrája, M_{ed} az átviteli függvény a d bizonytalansági kimenetről az e bizonytalansági bemenetre valamint M_{ev} az átviteli függvény a v hibáról az e bizonytalansági bemenetre.

- Bebizonyítottam, hogy a nyílt hurok alapján tervezett és zárt hurokban működtetett F_{ol} detektáló szűrő $\|e_{cl}^\Delta\|$ becslési hibájának normája csökkenthető az $\|M_{yv}\|_\infty$ átviteli függvény \mathcal{H}_∞ normájának minimalizálásával, azaz a hiba hatásának a kimeneten történő elnyomásával, amely az alábbi módon számítható:

$$M_{ev} = G_{ev} + G_{eu}K(I - G_{yu}K)^{-1}G_{yv} = G_{ev} + G_{eu}KM_{yv}$$

ahol M_{yv} az átviteli függvény a v hibáról az y kimenetre.

4. Tézis (5.2 és 5.3 fejezetek). *Kidolgoztam az átkonfigurálható szabályozók tervezési problémájának egy LPV szabályozó tervezésen alapuló megoldását, amelyben a detektáló szűrő reziduál jelét, mint LPV paramétert használtam fel a szabályozó modelljében, biztosítva ezzel a szabályozó átkonfigurálását aktuátor hiba esetén. [J1, C1, C4, C6, C7, C8, C20]*

- A hibadetektáló szűrő ρ_v reziduál kimenetének felhasználásával paramterizáltam az aktuátor hibák által jellemzett modellek (A, B_i, C) állapot-tér halmazát.

- LPV szabályozó tervezési problémaként megfogalmazott hibatűrő irányítást dolgoztam ki haszongépjárművek menetstabilizáló rendszeréhez, amely biztosítja a beavatkozó szerv hibájának detektálását, valamint aktuátor hiba előfordulása esetén a szabályozó átkonfigurálásával megakadályozza a jármű borulását. A hibatűrő irányítási rendszert szimulációs kísérletekkel validáltam.

Publikációk

Folyóirat

- [J1] P. Gáspár, **I. Szászi**, and J. Bokor, *Reconfigurable control structure to prevent the rollover of heavy vehicles*, Control Engineering Practice (accepted).
- [J2] I. Szászi, A. Marcos, G. Balas, and J. Bokor, *Lpv detection filter design for a boeing 747-100/200 aircraft*, Journal of Guidance, Control and Dynamics (accepted).
- [J3] P. Gáspár, **I. Szászi**, and J. Bokor, *Design of robust controllers for active vehicle suspension using mixed μ synthesis*, Int. Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Vehicle System Dynamics, **vol. 40** (2003), no. 4, 193–228.
- [J4] P. Gáspár, **I. Szászi**, and J. Bokor, *Robust control design for mechanical systems using the mixed μ synthesis*, Periodica Polytechnica. Ser. Transportation Engineering **vol. 30** (2002), no. 1-2, 37–52.
- [J5] **I. Szászi** and B. Kulcsár, *Robust control and fault detection filter design for aircraft pitch axis*, Periodica Polytechnica. Ser. Transportation Engineering **vol. 29** (2002), no. 1-2, 83–100.
- [J6] P. Gáspár, **I. Szászi**, and J. Bokor, *Mixed $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$ control design for active suspension structures*, Periodica Polytechnica. Ser. Transportation Engineering **vol. 28** (2000), no. 1-2, 3–16.

- [J7] **I. Szászi** and J. Bokor, *Integrated design of control and fault diagnostic modules for a mass-spring system*, Research News. Special Issue **vol. 4** (2000), 166–176.
- [J8] **I. Szászi** and P. Gáspár, *Robust servo control design using the \mathcal{H}_∞/μ method*, Periodica Polytechnica. Ser. Transportation Engineering **vol. 27** (1999), no. 1-2, 3–16.
- [J9] **I. Szászi** and B. Kulcsár, *F-16 hosszirányú mozgásának irányítása \mathcal{H}_∞/μ szabályozóval*, Repüléstudományi Közlemények **vol. 1** (2002).

Konferencia

- [C1] P. Gáspár, **I. Szászi**, and J. Bokor, *Rollover stability control for heavy vehicles by using LPV model*, Proc. of the IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, 2004, (accepted).
- [C2] P. Gáspár, **I. Szászi**, and J. Bokor, *Active suspension design using LPV control*, Proc. of the IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, 2004, (accepted).
- [C3] P. Gáspár, **I. Szászi**, and J. Bokor, *The application of linear parameter varying control to active suspension design*, Proc. of the European Control Conference, 2003, p. CD.
- [C4] P. Gáspár, **I. Szászi**, and J. Bokor, *Braking control to prevent the rollover of heavy vehicles based on a linear parameter-varying model*, Proc. of the European Control Conference, 2003, p. CD.
- [C5] P. Gáspár, **I. Szászi**, and J. Bokor, *The application of linear parameter varying control to active suspension design*, Proc. of the 4th IFAC Symposium on Robust Control Design, 2003, pp. FA02–2.
- [C6] P. Gáspár, **I. Szászi**, and J. Bokor, *Rollover avoidance for steer-by-wire vehicles by using linear parameter varying methods*, Proc. of

the 11th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, 2003, pp. T7–080.

- [C7] P. Gáspár, **I. Szászi**, and J. Bokor, *Design of fdi filter for the combined yaw-roll control system of heavy vehicles*, Preprints of the 5th IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process, 2003, pp. 459–464.
- [C8] P. Gáspár, **I. Szászi**, and J. Bokor, *Fault-tolerant control structure to prevent the rollover of heavy vehicles*, Preprints of the 5th IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process, 2003, pp. 465–470.
- [C9] B. Kulcsár, **I. Szászi**, and J. Bokor, *\mathcal{H}_∞ disturbance rejection on residual output*, Preprints of the 5th IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process, 2003, pp. 519–524.
- [C10] **I. Szászi**, B. Kulcsár, G. Balas, and J. Bokor, *Design of fdi filter for an aircraft control system*, Proc. of the American Control Conference, 2002, pp. 4232–4237.
- [C11] P. Gáspár, **I. Szászi**, and J. Bokor, *Design of robust controllers for active vehicle suspension*, Preprints of the 15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control, 2002, pp. Session T–Th–E21.
- [C12] **I. Szászi**, P. Gáspár, and J. Bokor, *Nonlinear active suspension modelling using linear parameter varying approach*, Proc. of the 10th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, 2002, pp. Session THA 5–4.
- [C13] **I. Szászi**, S. Ganguli, A. Marcos, G. Balas, and J. Bokor, *Application of fdi to a nonlinear boeing-747 aircraft*, Proc. of the 10th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, 2002, pp. Session FA4 (invited)–4.

- [C14] **I. Szászi**, A. Marcos, G. Balas, and J. Bokor, *Lpv detection filter design for boeing 747-100/200*, Proc. of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 2002, pp. AIAA 2002–4957.
- [C15] P. Gáspár, **I. Szászi**, G. Balas, and J. Bokor, *Active suspension design based on mixed uncertainty modelling*, Proc. of the European Control Conference, 2001, pp. 3624–3629.
- [C16] P. Gáspár and **I. Szászi**, *Robust \mathcal{H}_∞/μ control design for an inverted pendulum*, Preprints of the IFAC Conference on Control System Design, 2000, pp. 408–413.
- [C17] P. Gáspár and **I. Szászi**, *Robust servo control design using identified models*, Proc. of the 3rd IFAC Symposium on Robust Control Design, 2000, p. W3B/27.
- [C18] P. Gáspár, **I. Szászi**, T. Bartha, I. Varga, J. Bokor, L. Palkovics, and L. Gianone, *Visual lane and obstruction detection system for commercial vehicles*, Preprints of the 4th IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process, vol. 2, 2000, pp. 908–913.
- [C19] B. Kulcsár, **I. Szászi**, and J. Bokor, *Robust extension of fundamental problem of residual generation*, Proc. of the 8th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, 2002.
- [C20] **I. Szászi**, S. Ganguli, G. Balas, and J. Bokor, *Reconfigurable control design for boeing 747-100/200*, Proc. of the 8th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, 2002.
- [C21] P. Gáspár, **I. Szászi**, and J. Bokor, *Mixed μ synthesis for mechanical systems*, Proc. of the 8th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, 2002.
- [C22] **I. Szászi**, P. Gáspár, and J. Bokor, *Integrated control design and fault diagnostic: a case study*, Symposium on Intelligent Systems in Control and Measurement, 2000, pp. 162–167.

- [C23] **I. Szászi**, *Integrated control design and fault diagnostic: a case study*, Symposium on Intelligent Systems in Control and Measurement, 1998, pp. 255–266.

Egyéb

- [O1] P. Gáspár, **I. Szászi**, J. Bokor, *Villamos targonca irányításának tervezése soros kompenzálással*, oktatási segédanyag az Irányítástechnika II. c. tantárgyhoz, 2002. BME Közlekedésautomatikai Tanszék.
- [O2] P. Gáspár, **I. Szászi**, J. Bokor, *Inverz inga irányításának tervezése állapot-visszacsatolással*, oktatási segédanyag az Irányítástechnika II. c. tantárgyhoz, 2002. BME Közlekedésautomatikai Tanszék.
- [O3] P. Gáspár, **I. Szászi**, J. Bokor, *Matlab alkalmazása az irányítástechnikában*, oktatási segédanyag az Irányítástechnika II. c. tantárgyhoz, 2002. BME Közlekedésautomatikai Tanszék.
- [O4] **I. Szászi**, K. Kurutz, *Négy pólusok tárgyalása Laplace transzformációval*, oktatási segédanyag az Elektrotechnika II. c. tantárgyhoz, 2002. BME Közlekedésautomatikai Tanszék.

Irodalomjegyzék

- Balas, G. & Bokor, J. (2000), Detection filter design for lpv systems, *in* 'Preprints of the 4th IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process', pp. 653–656.
- Balas, G., Bokor, J. & Szabo, Z. (2002), Failure detection for lpv systems - a geometric approach, *in* 'Proc. of the American Control Conference', pp. 4421–4426.
- Boskovic, J. D. & Mehra, R. K. (1998), A multiple model-based reconfigurable flight control system design, *in* 'Proc. of the 37th IEEE Conference on Decision and Control', pp. 4503–4508.
- Boskovic, J. D. & Mehra, R. K. (1999), Stable multiple model adaptive flight control for accomodation of a large class of control effort failures, *in* 'Proc. of the American Control Conference', pp. 1920–1924.
- Boskovic, J. D., Yu, S. H. & Mehra, R. K. (1998), Stable adaptive fault-tolerant control of overactuated aircraft using multiple models, switching and tuning, *in* 'Proc. of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference', Vol. 1, pp. 739–749.
- Chen, J. & Patton, R. J. (1999), *Robust Model based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*, Kluwer, Boston/Dordrecht/London.
- Doyle, J. C., Glover, K., Khargonekar, P. P. & Francis, B. A. (1989), State space solutions to standard \mathcal{H}_2 and \mathcal{H}_∞ control problems', *IEEE Trans. Automatic Control* vol. **AC-34**(8), 831–847.

- Edelmayer, A., Bokor, J. & Keviczky, L. (1997), A scaled \mathcal{L}_2 optimisation approach for improving sensitivity of \mathcal{H}_∞ detection filters for ltv systems, *in* 'Proc. of the 2nd IFAC Symposium on Robust Control Design', pp. 543–548.
- Edelmayer, A., Bokor, J. & Szabo, Z. (2003), A geometric view on inversion-based detection filter design in nonlinear systems, *in* 'Preprints of the 5th IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process', pp. 783–788.
- Edelmayer, A., Bokor, J., Szigeti, F. & Keviczky, L. (1997), 'Robust detection filter design in the presence of time-varying system perturbations', *Automatica* **vol. 33**(3), 471–475.
- Frank, P. M. & Ding, X. (1994), 'Frequency domain approach to optimally robust residual generation and evaluation for model-based fault diagnosis', *Automatica* **vol. 30**(4), 789–804.
- Ganguli, S., Marcos, A. & Balas, G. (2002), Reconfigurable lpv control design for boeing 747-100/200 longitudinal axis, *in* 'Proc. of the American Control Conference', Vol. 5, pp. 3612–3617.
- Gertler, J. (1998), *Fault detection and diagnosis in engineering systems*, Marcel Dekker, New York.
- Hammouri, H., Kinnaert, M. & El Yaagoubi, E. H. (1999), 'Observer based approach to fault detection and isolation for nonlinear systems', *IEEE Trans. Automatic Control* **vol. AC-44**(10), 1879–1884.
- Massoumnia, M. A. (1986), 'A geometric approach to the synthesis of failure detection filters', *IEEE Trans. Automatic Control* **vol. AC-31**(9), 839–846.
- Napolitano, M. R., Song, Y. & Seanor, B. (2001), 'On-line parameter estimation for restructurable flight control systems', *Aircraft Design* **vol. 4**, 19–50.

- Niemann, H. & Stoustrup, J. (1997), Integration of control and fault detection: nominal and robust design, *in* 'Preprints of the 3th IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process', pp. 341–346.
- Packard, A. & Doyle, J. C. (1993), The complex structured singular value', *Automatica* **vol. 29**(1), 71–109.
- Persis, C. D. & Isidori, A. (2000), 'On the observability codistributions of a nonlinear systems', *Sys. Control Letters* **vol. 40**, 297–304.
- Stoustrup, J. & Grimble, M. J. (1997), Integration control and fault diagnosis: A separation result, *in* 'Preprints of the 3th IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process', pp. 323–328.
- Szigeti, F., Vera, C. E., Bokor, J. & Edelmayer, A. (2001), Inversion based fault detection and isolation, *in* 'Proc. of the 40th IEEE Conference on Decesion and Control', pp. 1005–1010.
- Young, P. M., Newlin, M. P. & Doyle, J. C. (1991), μ analysis with real parametric uncertainty, *in* 'Proc. of the 30th IEEE Conference on Decesion and Control', pp. 1251–1256.
- Zhou, K. & Doyle, J. C. (1996), *Robust and Optimal Control*, Prentice Hall, New Jersey.