

## Zárójelentés 2003-2005

A kutatási programban nemlineáris rendszerek ún. lineáris, paraméter-változós (LPV) modellezésével és rendszer elméleti tulajdonságainak kidolgozásával foglalkoztunk. Az LPV modellosztály olyan, formailag lineáris modellel ír le bizonyos nemlineáris rendszereket, amelyek vagy egy külső időfüggő de mérhető, vagy a rendszer állapot változóitól is függő jelekkel vannak parametrizálva. Az LPV rendszerek alkalmazása különösen légi és földi járművek irányítási feladatainak megoldásában vált nagy jelentőségűvé és főleg algebrai rendszerelméleti, illetve irányításelméleti módszerekkel közelítették meg. Sok feladat megoldásánál, különösen a nemlineáris tulajdonságok figyelembe vétele miatt szükség van azonban a geometriai rendszerelmélet nyújtotta megoldásokra is, amelyekre vonatkozó eredmények eddig alig álltak rendelkezésre. Elméleti eredményeink így elsősorban ezek kidolgozására irányultak az alábbiak szerint.

Kidolgoztuk a lineáris idő-invariáns rendszereknél ismert invariáns alterek, mint például az  $A$ ,  $(A,B)$ ,  $(C,A)$  invariáns alterek, az ezekkel definiálható irányíthatósági és irányítható, nem-megfigyelhetőségi és nem-megfigyelhető alterek (a nemlineáris rendszereknél ezek lokálisan vektor tér disztribúciók) fogalmait és affin LPV parametrizálásra. Ezek az  $A(\rho)$ ,  $(A\rho),B(\rho)$ ,  $(C,A(\rho))$  altércsaládok egy  $\rho$  paraméterrel vannak parametrizálva, amely adott-időpillanatig mérhető függvények, illetve mért állapotoktól is függhetnek. Ez utóbbi esetben quasi-LPV rendszerekről beszélünk, ezek tipikusak a jármű modellezési és irányítás feladatok nagy részében.

Általánosítva a lineáris rendszerekre ismert algoritmusokat kidolgoztuk a paraméter változós invariáns altér-családok kiszámítási algoritmusait. Ezek az eredmények több nemzetközi konferencia kiadványban [13, 14, 15, 16], illetve az irányításelmélet egyik

vezető elméleti folyóiratában, az IEEE Transaction on Automatic Control-ban jelentek meg [1].

Új eredmények születtek az LPV rendszerek irányíthatósági és megfigyelhetőségi tulajdonságainak vizsgálatában. Ezek a magyar származású Rudolf E. Kalman híres eredményeinek LPV rendszerekre való kiterjesztését jelentik. Affine LPV rendszereknél Lie – algebrai módszertan alkalmazásával megmutattuk, hogy a jól ismert Kalman – rang feltételnek megfeleltethető egy, a Lie - bázishoz kötődő ún. általánosított Kalman – rang feltétel, de ezenkívül még egy differenciál algebrai feltételt is kell vizsgálni, amely a  $\rho$  függvényeket tartalmazza egy Wei – Normann egyenleten keresztül.

Ez az eredmény nemcsak azért érdekes, mert lehetővé teszi a szabályozás tervezésben alapvető irányíthatóság (duális problémánál a megfigyelhetőség) ellenőrzését, hanem felhívja a figyelmet arra, hogy a nemlineáris vagy időfüggő rendszerek esetén az LPV modellezési paradigmák alkalmazásakor a nem egyértelmű LPV modellekre való áttérés oda vezethet hogy elveszítjük az eredeti rendszer irányíthatóságát, illetve ez a tulajdonság nem lesz érvényes a teljes állapotterén vagy állapotokaságon.

Az eredményeket az 16th IFAC World Congress (2005) szemiplenáris előadáson foglaltuk össze és adtuk elő.

A fenti eredmények felhasználásával több irányítási és detektálási alapfeladat megoldására adtunk javaslatot, így az LPV zavarkompenzálásra és a hibadetektáló szűrők tervezésére is, amelyek korábban LPV rendszerekre nem voltak megoldottak [3, 11, 17, 33, 35].

A hibadetektáló szűrők tervezése az adott hibák esetén átkonfiguráló irányítás tervezés szempontjából, de önmagában rendszer diagnosztikai célból is fontos feladat. Az alapkonceptió az, hogy adott hibák együttes előfordulása esetén is tudjunk különbséget tenni hogy milyen hiba lépett fel, sőt becslést tudjunk adni (aszimptotikusan) a hiba jellemzőire is. Ehhez egy olyan állapotmegfigyelőt (detektort) tervezünk, amelyben a

detektálni kívánt hiba input megfigyelhető, míg a többi hiba hatás a detektáló szűrő ún. nem-megfigyelhetőségi alterében jelenik csak meg, így nem befolyásolja a vizsgált hiba jel alakulását. Ennek megfelelően egy detektáló szűrő családot tervezünk. Lényeges kérdés a szűrők robusztussága a hibákra és a nem modellezett dinamikával valamint a parametrikus bizonytalanságokkal szemben.

A tervezés elméletét a paraméter változós invariáns altér családok koncepciójának bevezetésével és számítási algoritmusaik kidolgozásával alapoztuk meg, majd ezek után kidolgoztuk az LPV hibadetektáló szűrő tervezési algoritmusokat. A korábbi irodalmi eredményektől lényeges továbblépés a stabilitás és a robusztusság biztosításában jelenik meg. A stabilis szűrők tervezését meg tudtuk fogalmazni Lineáris Mátrix Egyenlőtlenség (LMI) alakban, amik megoldására az utóbbi években kidolgozott belső pontos konvex optimalizálási algoritmusok alkalmasak. A külső zajok és elhanyagolt dinamikára vonatkozó robusztusságot az LPV modellekhez alkalmasan kiterjesztett Hinf elmélet segítségével oldottuk meg speciális esetekre.

Az elméleti eredményeket és algoritmusokat a gépjárművek és repülőgépek irányítási feladatainak megoldására alkalmaztuk.

Gépjárművek.

A gépjárművek esetén a fékezési és pályaelhagyási, illetve a borulási szituációkban alkalmazható irányítási stratégiákat vizsgáltuk. A modellek LPV modellek, a zavarójel egyike az útgerjesztés hatás a futóműre. Ez utóbbit speciális, az LPV modellekhez kidolgozott ún. Input-becslési módszerrel identifikáltuk [2, 18, 19, 20, 21, 22]. A felfüggesztés irányításának (aktív felfüggesztés) tervezésére több új módszert dolgoztunk ki, amely képes figyelembe venni mind a tengely körüli (roll), mind a legyezési (yaw) és vertikális (pitch, mint pl. a bólintó mozgás) dinamikát. A fizikai járműparaméterek bizonytalanságát valós parametrikus bizonytalansággal modelleztük, amire a strukturált szinguláris érték analízis és Hinf szintézis segítségével lehet irányítást tervezni. Megjegyezzük, hogy az első, lineáris rendszerekre elérhető ún.

Mixed -  $\mu$  tervezési szoftver a MATLAB csomaghoz Prof. G. Balas professzor irányításával készült, aki a jelen kutatás amerikai társkutatója. Így az irodalomban viszonylag elsőként alkalmaztunk ilyen módszereket, illetve dolgoztunk ki néhány speciális megoldást LPV esetre. A borulási szituáció gyors detektálására az általunk kidolgozott LPV detektáló szűrőket alkalmaztuk [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

Légi járművek.

Az LPV modellezést és irányítást légi járművekre és azok speciális alakzataira a University of Minnesota Aerospace and Mechanics tanszékén rendelkezésre álló Boeing 747 repülőgép hi-fidelity modelljének segítségével terveztük. A repüléstechnikában a dinamikus inverzió alapuló irányításnak fontos szerepe van, LPV rendszerre azonban nem voltak meg az LPV rendszer inverz előállításának elvei és módszerei. Az ezen a téren kapott eredményeink [14, 15, 16] lehetőséget adtak a Boeing 747 repülőgéphez mind dinamikus inverz alapú szabályozás, mind az LPV hibadetektáló szűrők alkalmazásával a longitudinális repülésdinamikához rekonfiguráló irányítási rendszer tervezésére. A [25, 35] irodalmak foglalják össze a tervezési módszereket és eredményeket.

A gépjármű- és repülési alakzatok irányításában elért eredmények a [25, 26, 32] jelentek meg.

A fenti kutatási programban és az eredmények kidolgozásában szorosan együttműködtünk az University of Minnesota Aerospace and Mechanics tanszékével és a BME Közlekedésautomatizálási Tanszékkel. A Tanszék munkatársai a modellek validálásához szükséges méréseket, valamint a repülés irányítási feladatok modellezését végezték el, valamint lényeges hozzájárulások voltak az LPV hibadetektáló szűrők elméletének és módszertanának és a repülésirányítási feladatok megoldásában.

A 2003-2005 évi kutatási időszakban OTKA támogatással 34 publikáció és 1 könyv ([23], társszerzőkkel) jelent meg. Eredményeinket nemzetközi konferencia kiadványokban és idegen nyelvű folyóiratokban publikáltuk. A kutatással összefüggésben, 2004 évben megvédésre került egy PhD disszertáció: Szászi I.: Design of fault detection and isolation filters for reconfigurable control systems címmel. 2005-ben Gáspár Péter benyújtotta értekezését az MTA doktora címre, ez a munka is jelentős mértékben kapcsolódik a fenti kutatáshoz.