

Hibadetektálás korszerű analitikus módszerei járműipari alkalmazásokkal*Kutatási Zárójelentés**Kutatás időtartama: 2006.01.31-2009.01.31***A KUTATÁSI TERÜLET MEGHATÁROZÁSA**

A korszerű ipari technológiai folyamatok és rendszerek szerkezeti és működésbeli bonyolultságának növekedésével a modern technológia egyre növekvő számban hoz létre olyan jellemzően nagy anyagi értéket képviselő dinamikus rendszereket, amelyekben a működés biztonsága gyakran mindenek felett álló tervezési szempont. Érthető módon a rendszerek által tartalmazott összetevő-elemek, szenzorok és beavatkozó szervek számának növekedésével egyre nagyobb figyelmet kell szentelni azok megbízható működésének. Különösen igaz ez az olyan nagy működési kockázattal járó helyeken mint a repülőgépek és űreszközök irányítása, a nukleáris és vegyipar bizonyos veszélyes folyamatai és az autóipar, ahol adott esetben emberéletek, jelentős anyagi értékek, s nem utolsósorban a természeti környezet biztonsága forog kockán. Ezzel párhuzamosan és ezen technológiák fejlődésétől nem függetlenül a *beágyazott* irányítási rendszerek megjelenésével (nevezett területeken a beágyazott irányítórendszerek szinte kizárólagos technológiákká váltak) az irányítórendszerek biztonságos működtetésének egészen új szempontjai kerültek előtérbe. Ezek a szempontok megkövetelik, hogy az irányítórendszert és irányított folyamatot egymás szimbiózisában kezeljük.

A beágyazott rendszerek fedélzeti irányítórendszerekben való általánossá válásával egy másik figyelemreméltó fejlődési –átalakulási folyamat, maguknak az irányított rendszereknek nagymértékben elosztott megvalósítási módja. Ez az elosztottság térbeli és funkcionális elosztottságot is jelent egyben. Egy jármű fő funkcióelemeinek realizálását (pl. elektronikus járműdinamika stabilizáló rendszerek – ESC), elosztott, egymással kommunikáló beágyazott mikrovezérlőkre épülő fedélzeti irányítórendszerek (adott esetben ABS, aktív kormányzás, motorteljesítmény szabályozás) egymással együttműködve látják el. Az ilyen elosztott rendszerekben való szűrés és detektálás új feladat elé állítja és a korábbi, 'stand-alone' rendszerekre vonatkozó eredmények újragondolására kényszeríti a kutatókat. Nevezett kérdéskör problémáinak tisztázása és irodalmának feldolgozása nyomán keletkezett és mások által is hasznosíthatónak vélt információkat [1], [5]-ben tettük közzé.

A hibadetektáló rendszerek alkalmazásának legfőbb célja, hogy a hibákat még kialakulásuk kezdeti fázisában azonosítani tudjuk. Akkor, amikor a folyamatok leterhelésével, leállításával vagy átkonfigurálásával, a kritikus következményekkel járó hatások még elkerülhetők. Ugyancsak hibadetektálás kell, hogy megelőzze az irányítórendszer átkonfigurálását célzó műveleteket amiket annak érdekében kívánunk végrehajtani, hogy az irányított rendszer hibatűrési tulajdonságait javítsuk (hibatűrő rendszerek).

A változás és hibadetektálási probléma megfogalmazására és megoldására az irodalomban több irányzatot is találunk. A detektálási feladat megoldható a megfigyelt folyamat modelljének ismeretében vagy anélkül. A modell alapú megközelítések az egyik legfontosabb és a gyakorlatban az egyik legsikeresebb feladatosztályt jelentik. Az általunk követett kutatási tematika is a modellek ismeretén és kvantitatív analitikus módszerek alkalmazásán alapuló módszerek kutatását tűzte ki célul.

Annak általános felismerésével, hogy a modellek ismeretében elkerülhetetlenül jelenlévő bizonytalanság és a folyamatokat terhelő zajok és zavarok valamint a folyamatokban jelen levő nemlinearitások hatása a detektálás hatékonyságát jelentős mértékben leronthatják, a detektálási folyamat robusztusságának biztosítása minden detektálási, szűrési módszer alaptulajdonsága kell, hogy legyen.

A robusztus detektálási módszerek kutatása általában egy többváltozós optimalizálási problémára vezet, amely probléma megoldásának célja, hogy a detektálás olyan egymással ellentétes tulajdonságait, mint a zavarokkal szemben értelmezett *robusztusság* és a detektálható jelre vett *érzékenység* egy adott alkalmazáson belül a legkívánatosabb mértékben behangolhatóvá tegyük.

A TÉMA NEMZETKÖZI ÉS HAZAI ELŐZMÉNYEI

A korábbi OTKA pályázatokon alapult kutatásaink során jelentős, nemzetközi érdeklődést kiváltó új alapkutatás jellegű eredményeket értünk el a robusztus hibadetektálási módszerek területén mind lineáris idő-invariáns (LTI) és lineáris időben változó dinamikájú (LTV), lineáris paraméter változós (LPV) és nemlineáris rendszerekre vonatkozóan. Munkánk során feltérképeztük és számba vettük azokat a problémákat, illetve azok megoldására igénybe-vehető eszközöket és módszereket, amelyek utat mutathatnak a nemlineáris problémák újszerű kezelésének irányába is. A fent jellemzett rendszerosztályokra nézve foglalkoztunk a zavarszétcsatolás ill. robusztusság és detektálási érzékenység problémakörével. A detektálósűrő tervezési feladatok H-infinity optimalizálási módszerrel vett megoldását (az ún. *H-infinity* detektálósűrőt) sok vonatkozásban a témavezető nevéhez köti az irodalom. A jelen pályázat tematikájának újszerűsége az alapkutatási célok és ezek implikálta feladatok alkalmazáscentrikus (járműrendszerek, beágyazott implementációk) megközelítésében rejlett.

KITŰZÖTT KUTATÁSI CÉLOK

Kutatási programunkat a következő összetartozó de tematikailag jól elkülöníthető problématerületek mentén végeztük.

a) *Robusztus detektálósűrők tervezési elméletének kutatása*

Kutatási tervünkben célul tűztük olyan detektálósűrő tervezési eljárások kutatását és alkalmazásfejlesztését, amelyek a megfigyelt rendszerben bekövetkező változások minimális késedelemmel történő, hamis riasztásokat elkerülő detektálására alkalmasak a mindenkor elérhető legjobb érzékenységgel és robusztussági mutatók mellett azon esetekben, amikor az LTI, LTV, LPV vagy nemlineáris rendszer modellje csak bizonytalanul ismert és a folyamatot zavarok is terhelik. A feladatok megoldására a korábban alkalmasnak bizonyult analitikai, algebrai és geometriai elveket alkalmaztuk.

A kutatás egyik hangsúlyos célkitűzése volt a rendszer modelljének invertálásán alapuló detektálósűrők tulajdonságainak kutatása, ideértve elsősorban az inverz geometriai tulajdonságait és az inverz dinamika előállítására vonatkozó módszereket, zajokkal és bizonytalanságokkal terhelt esetekben. A kutatás tárgyaként lineáris és nemlineáris rendszereket egyaránt megjelöltünk. Legfontosabb eredményünk az inverz dinamikájának online becslésére épülő H-infinity optimális szűrés módszerének kidolgozása volt, ami jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, elismert, új tudományos eredményekhez vezetett.

Erre építkezve, a kidolgozott módszerek finomításával és továbbgondolásával számos új publikáció született [2], [3], [6], [7], [8]. Az összetartozó eredmények szintézisét egy összefoglaló cikk formájában megfogalmazva respektált folyóirathoz küldtük el közzététel céljából [15].

Megközelítéseinkben folytattuk annak a két jellemző problémaosztálynak kutatását, amelyek eddigi munkánkat meghatározták. Nevezetesen az alábbi feladatokat különböztettük meg:

1. *Robusztusság biztosítása teljes zavarszétcsatolással (exact decoupling)*. A zavarok hatását teljesen kiküszöbölhetjük és így a hibák detektálását maximális érzékenységgel megvalósíthatjuk a hibák és zavarok egymásra való hatásának a szűrő output terében történő teljes szétválasztásával (szétcsatolásával).
2. *Robusztusság biztosítása a zavarok hatásának optimális gyengítésével (approximate decoupling)*. A legtöbb esetben a detektálási módszer robusztussága csak részleges

szétcsatolással és a zavarok hatásának optimális gyengítésével érhető el. Ilyenkor a hibák detektálásának érzékenysége csak a módszer zajelnyomási tulajdonságának rovására növelhető.

A kutatásunk és a most záruló OTKA projektünk egyik legfontosabb eredményeként értékelhetjük azt az általunk most kidolgozott szűrési –detektálási módszert, ami a fenti két hagyományos nézőpontot egy teljesen új megközelítésbe helyezi és a következő robusztus detektálási módszerrel egészíti ki:

3. *Robusztusság biztosítása a zavarokkal terhelt hibajelek teljes szétcsatolásával majd a zavarok hatásának optimális gyengítésével.* Bizonyos esetekben nagyon jó performancia tulajdonságokkal rendelkező szűrő tervezhető, ha a detektálási feladatot két lépésben, először a zavarokkal terhelt hibajelek teljes szétcsatolásával majd, egy második lépésben a már szétválasztott hibajeleken ható zavarok hatásának optimális gyengítésével végezzük.

A fenti újszerű probléma megküzelítést és megoldást az inverz rendszermodellen alapuló kombinált H-infinity szűrés módszerének kidolgozása tette lehetővé, amelynek nem voltak az irodalomban előzményei.

Algebrai/geometriai módszereket vettünk számításba az időtartományban az ún. szétcsatolható és frekvenciatartománybeli *H-infinity* optimalizálási módszereket a nem szétcsatolható detektálási problémák megoldása során.

Alapvetően azokra az eredményekre támaszkodva, amelyeket az elmúlt kutatási időszakok során értünk el, továbbhaladtunk a nemlineáris problémák megoldásában. Erre alapvetően a korábban általunk bevezetett dinamikus rendszer-inverzió alapuló detektálási módszerek szolgáltak alapul. Ennek során számos, a lineáris rendszerek esetében már megértett és letisztázott matematikai rendszertulajdonság nemlineáris rendszerekben történő újraértelmezésére volt szükség. A rendszer inverzének tulajdonságai, az inverz előállításának módja és feltételei valamint a bizonytalanságok kezelésének módja nemlineáris esetekben azonban továbbra is fontos tisztázásra váró problémák.

Járműdinamikai alkalmazásokra vonatkozóan LPV modellezési technikára alapozva születtek a hibatűrő módszerekre vonatkozó jelentős új eredmények, amelyeket [11], [12]-ben publikáltunk. Az elosztott implementációkban jut jelentős szerephez az ún. kapcsoló üzemmódú rendszerek (switching systems) alkalmazása, amelyek a meghibásodás detektálása után irányítási stratégiát váltva képesek beavatkozásra – és időlegesen akár a hiba rendszerből történő kiiktatására. Egy ilyen módszer került publikálásra [13]-ban.

Jelentős nemzetközi együttműködés eredménye volt a C. S. Draper Laboratórium (Cambridge, MS.) munkatársaival végzett közös kutatás, amely a dinamikus rendszerek detektálási problémáit a jelfeldolgozásban használatos detektálási módszerekkel vetette össze, feltárva a két tudományterület által követett módszertanok (invariáns alterek elmélete) hasonlóságát és összecsengését, sok esetben az eddig függetlenként számontartott módszerek és megközelítések mély elméleti azonosságát [17].

b) Hibatűrő szűrési, -detektálási módszerek kidolgozása elosztott dinamikus rendszerekben történő alkalmazásra

Kutatásaink másik hangsúlyos irányvonala az elosztott rendszerekben történő szűrési és detektálási módszerek kidolgozása volt. Ezzel kapcsolatban meg kell jegyezni, hogy a kutatás érdekes új fordulatot vett és az eredetileg célul tűzött (bár a tervekben ílymódon soha meg nem jelölt) megközelítést az elosztott (distributed) implementációk irányába nagyon ígéretes módszerek alkalmazásával terjesztettük ki. Az eltérés nem jelenti a kutatási terv feladását vagy az eredeti tervekkel össze nem férő módosítását, sokkal inkább annak fontos, új irányokba történő kibővítését. A kutatás súlyponti része ebbe az új ígéretes irányba mozdult el.

Annak érdekében, hogy megvizsgáljuk, hogy a fenti szűrési módszerek hogyan lesznek alkalmazhatók az elosztott jármű fedélzeti rendszerekben történő felhasználásra, kezdtünk el

foglalkozni a bonyolult, nemlineáris folyamatok állapotbecslési, nemlineáris szűrés módszereinek elosztott implementációt támogató újszerű elveivel. Az ún. szövetségi (federated) szűrés elv speciális alkalmazásait intenzív folyamatszimulációs tevékenységünk eredményeire támaszkodva dolgoztuk ki.

Az ehhez a témakörhöz kapcsolódó kutatásaink legfontosabb eredményeként kell, hogy értelmezzük azt a felismerést, hogy az esetekentént nagyméretű, elosztott, erőforrás korlátozott beágyazott irányító-rendszerekben a rendszerben bekövetkező hibák detektálásának és a rendszer állapotainak becslésének sikerességét és performancia tulajdonságainak kézbentartását az elosztott struktúrához igazodó speciális szűrő architektúrákkal lehet csak biztosítani. Ezt a speciális architektúrát most a szövetségi (federated) szűrőstruktúrákban kerestük. A témakör feldolgozása nyomán születtek a [4], [9] publikációk, amelyek az elv használhatóságát, hibátűrését és performancia jellemzőit demonstrálták.

A szűrés módszer továbbgondolása révén születtek a [10], [14]-ben publikált eredmények, amelyek egy a szövetségi szűrés elvein nyugvó elosztott állapotbecslési módszert kooperatív ad-hoc járműkommunikációs hálózatokban történő alkalmazásra adnak lehetőséget. A módszert összefoglaló közlemény a szakterület neves folyóiratának 2009-re tervezett különszámának meghívott publikációja [16].

REFERENCES

- [1] **Edelmayer, A.**: *Dependable vehicle electronic system architectures: from stand-alone systems to cooperative vehicle-infrastructure communication*, Journal of "A jövő járműve", Vol 6, No. 1-2, September, pp. 77-81. (in Hungarian), 2006.
- [2] **Edelmayer, A.**, J. Bokor and **Z. Szabó**: *Robust detection and estimation of faults by exact fault decoupling and H-infinity disturbance attenuation in linear dynamical systems*, IEEE American Contr. Conf. ACC'06, Minneapolis, MN. pp. 5716-5721, 2006.
- [3] **Edelmayer, A.**: *Fault Detection in Dynamic Systems: From State Estimation to Direct Input Reconstruction Methods*, D.Sc. Dissertation for degree of the Hungarian Academy of Sciences, p.189., 2007.
- [4] **Edelmayer, A.** and M. Miranda: *Federated filtering for fault tolerant estimation and sensor redundancy management in coupled dynamics distributed systems*, Proc. IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'07, Athens, Greece, T07-004., 2007.
- [5] **Edelmayer, A.**, and L. Virág,: *Time triggered network protocols for dependable vehicle applications*, Journal of "A jövő járműve", Vol 7, No. 3-4, (in Hungarian), 2007.
- [6] **Edelmayer, A.**, J. Bokor and Z. Szabó: *Exact fault and disturbance decoupling by means of direct input reconstruction and estimation of the inverse dynamics*, Proc. IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'07, Athens, T19-017., 2007.
- [7] **Edelmayer, A.**, J. Bokor and **Z. Szabó**: *Inversion-based approaches to robust fault detection and isolation with applications in linear systems*, Proc. 5th IEEE Intl. Conf. on Computational Cybernetics, ICC'2007, Gammarrh, Tunisia., 2007.
- [8] **Edelmayer, A.**, J. Bokor, **Z. Szabó** and S. Molnár: *Robust detection and estimation of faults by means of direct input reconstruction based on the estimation of the inverse dynamics*, 18th Int. Workshop on Principles of Diagnosis, DX'07, Nashville, TN. pp. 67-74., 2007.
- [9] **Edelmayer, A.**, M. Miranda and **L. Nádai**: *Fault Tolerant Estimation with Sensor Redundancy Management in Distributed Dynamical Systems by Means of Nonlinear Federated Filtering*, Proc. 18th Int. Workshop of Principles of Diagnosis, DX'07, Nashville, TN. pp. 283-289., 2007.

- [10] **Edelmayer, A.**, M. Miranda and J. Nebehaj: *A Cooperative Filtering Approach for Enhanced Position Estimation in ad-hoc Vehicle Networks*, Proc. 15th ITS World Congress, New York, NY., 2008.
- [11] Gáspár, P., **Z. Szabó** and J. Bokor: *Design of Reconfigurable and Fault-Tolerant Suspension Systems Based on LPV Methods*, Proc. 47th Conf. Decision and Contr, CDC'08, Cancun, Mexico, pp. 5384-5389., 2008.
- [12] Gáspár, P., **Z. Szabó** and J. Bokor: *The design of a reconfigurable suspension control system based on an FDI filter*, Proc. 16th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'08, Ajaccio, pp. 445 - 450., 2008.
- [13] **Szabó Z.**, J. Bokor and G. Balas: *Generalized Piecewise Linear Feedback Stabilizability of Controlled Linear Switched Systems*, Proc. 47th Conf. Decision and Contr, CDC'08, Cancun, Mexico, pp. 3410-3414., 2008.
- [14] **Edelmayer, A.**, and M. Miranda: *Estimating the State of Distributed Dynamical Systems Based on Limited Measurements by means of Cooperative Filtering with Application to ad-hoc Vehicle Networks*, Proc. 7th IFAC Symp. Safeprocess, Barcelona (Accepted), 2009.
- [15] **Edelmayer, A.**, J. Bokor and **Z. Szabó**: *Inversion-based residual generation for robust detection and isolation of faults by means of estimation of the inverse dynamics in linear dynamical systems*, *International Journal of Control* (In Press), 2009.
- [16] **Edelmayer, A.**, M. Miranda and V. Nebehaj: *A Cooperative Federated Filtering Approach to Enhanced Position Estimation and Sensor Fault Tolerance in ad-hoc Vehicle Networks*, IET Journal on Intelligent Transport Systems (submitted), 2009.
- [17] Mangoubi, R., M. Desai, **A. Edelmayer** and P. Sammak: *Robust Detection and Estimation in Dynamic Systems and Statistical Signal Processing: Intersections, Parallel Paths and Applications*, ECC'09 Special Issue of European Journal of Control (In Press), 2009.

Megj: A kutatási tervben szereplő kutatók neve kövér betűkkel szedve.