

Bíráói Vélemény

Molnár Sándor: „Strukturált rendszerek kvalitatív vizsgálata”
c. MTA doktori (DSc) értekezéséről

Az értekezés *Bevezetéssel* indul, amely körvonalazza a fontosabb vizsgált rendszerosztályokat és a jelölt értekezésének fontosabb tételeit.

Az 1. fejezet módszertani összefoglalót ad a differenciálalgebrai rendszerekről kommutatív gyűrű és egész számok feletti (a vektortérhez hasonló) modulus esetén. Ebben a keretben leírja a bemenettel, állapottal és kimenettel rendelkező rendszereket, a paraméterfüggést és speciálisan a lineáris rendszereket is, ahol a bemenetek deriváltjai is szerepelnek a rendszerleírásban. A leírást kiterjeszti parciális differenciálgyűrűkre is.

A 2. fejezet a lineáris időtől függő rendszerek elérhetőségének vizsgálatával foglalkozik (az irányíthatóság, megfigyelhetőség és rekonstruálhatóság visszavezethető erre a sémára), ahol az állapot a bemenőjel deriváltjaitól is függ. A vizsgálatok alapja az alapmátrix és az elérhetőségi Gram-mátrix. A leírásnál fontos szerepet játszik a Lie-zárójellel definiált szorzás, és az erre épülő Lie-algebra, de a szorzás nem kommutatív, ami a tárgyalást nehezíti. A Lie-algebra véges bázisában megadja az alapmátrix alakját a Wei-Norman-tétel bevonásával, a végállapot alakját és az elérhetőségi Gram-mátrixot. Ennek során fontos, hogy az exponenciális mátrixok sorrendje nem felcserélhető. A teljes elérhetőség szükséges és elégséges feltétele az általánosított Kalman-feltétel a 2.1 tétel alakjában. A szükségesség triviális, az elégségeshez bevezeti a perzisztens gerjesztés algebrai jellemzését, és LTV rendszerek esetén megfogalmaz egy gerjesztési feltételt a Diop-féle állapot-eliminációs eljárással a 2.2 tétel alakjában.

A 3. fejezet állapotól függő paraméterű LPV lineáris rendszerek teljes elérhetőségével foglalkozik, de amikor a bemenőjel deriváltja nem szerepel az állapotegyenletben. Ebben az esetben a Diop-elimináció nem alkalmazható, ezért a gerjesztési feltételt átfogalmazza a 3.1 és 3.2 tételek alakjában. A feltételek úgy is értelmezhetők, hogy ilyen rendszerek teljes elérhetősége esetén az állapotfüggő paraméterekből levezethető bizonyos parciális differenciálegyenleteknek nem szabad megoldhatónak lenniük. Az összefüggések az állapotegyenletben szereplő állapotfüggvények elérhetőségi disztribúciójával is kapcsolatban állnak. Ez differenciál-polinomiális egyenlőtlenségek alakjában fogalmazható meg, amely az elérhetőségi-disztribúció rangjának csonkításával és a Kalman-mátrix rangjával áll kapcsolatban, és a 3.3 tételben kerül megfogalmazásra.

A 4. fejezet LPTV (paramétertől és időtől függő) rendszerek approximációjával foglalkozik, ha a megengedett bemenőjelek egy korlátos konvex poliéderből vehetők, a paraméterek kompakt halmazból valók, és az approximáció szakaszonként konstans bemenőjel vektorból álló sorozat lehet. A modellben a bemenőjel deriváltja nem szerepel. A cél annak igazolása, hogy tetszőleges előírt pontosság esetén az időintervallum megfelelő finomításával az approximáció történhet a poliéder csúcaiból álló bemenőjel sorozattal. A problémát a Buck-Boost konverteren (egyszerű R, L, C kapcsolás) illusztrálja. Az eredményeket a 4.1 és 4.2 approximációs tételek fogalmazzák meg, amelyek bizonyítása felhasználja a 4.1 approximációs lemmát. Ennek során feltételezi a modellben szereplő rendszermátrixokban a paraméterektől való lineáris függést minden fix t esetén. Az eredményeket később kiterjeszti simasági feltételek teljesülése esetén a t -ben nemlineáris esetre.

Az 5. fejezet a korábban vizsgált approximáló rendszerek (teljes, nullába) irányíthatóságával foglalkozik. Egy példán illusztrálja, hogy még egyszerű kapcsolt rendszerek esetén is előfordulhat, hogy approximáló rendszerek esetén a stabilitás nem öröklődik. Az általánosság irányában tovább lépve megmutatja, hogy LTV rendszerek esetén az irányíthatósági Gram-mátrix változó időpont esetén egy Riccati differenciálegyenletnek tesz eleget. LPV rendszer esetén, ha az állapotegyenlet mátrixai t -ben egyenletesen Lipschitz-feltételnek tesznek eleget és a paraméter vektor szakaszonként folytonosan függ az időtől, akkor a korábbi 4.1 approximációs tételből következő 5.1 tétel szerint elegendően finom felosztás esetén az approximáló rendszer is irányítható marad. A továbbiakban az approximáló rendszer irányíthatósági mátrixának invertálhatóságát vizsgálja, amikor az állapotegyenlet mátrixai lineárisan függenek a paramétertől, alakjuk $A(p,t)$ és $B(p)$, az A mátrix esetén a paraméter egy (kompakt) konvex poliéderbe esik. Erre az estre a 4.2 tétel felhasználásával bizonyítja az 5.2 tételt az approximáló rendszer irányíthatósági mátrixának invertálhatóságáról. Keresi a kapcsolatot a Riccati-mátrix invertálhatósága és a Kalman-féle irányíthatósági mátrix rangja között konvex poliéderbe eső paraméter esetén. Ehhez összefüggést ad a poliéder csúcsai által generált Lie-algebra és a generált asszociatív algebra között Szigeti-Bokor-Edelmayer (1995) eredményeinek felhasználásával. Ez azt jelenti, hogy perzisztens gerjesztés esetén a paraméterekre bizonyos tiltott algebrai differenciálegyenletek nem állnak fenn. A problémát megvizsgálja a Pommeret-féle mérésfelfogás esetén is, skalár mérést és lineáris algebrát használva. Az eredményt az 5.2 tétel fogalmazza meg. Egy példa kapcsán illusztrálja, hogy az az időintervallum, ahol az állapotok nem irányíthatók nullába, függ az approximáció finomságától.

A 6. fejezet speciális struktúrájú, ún. vertikum típusú rendszerekkel foglalkozik, ahol az állapotegyenlet mátrixai blokk-alsó háromszög mátrixok. Az i -edik részrendszer ki-be kapcsolható, amelyet két balról folytonos p , q függvénnyel modellez, amely 0 és 1 értéket vehet fel. A $T_i(p,q)$ transzformációk segítségével alkalmasan választott Lie-algebrában tömör képletet ad az alapmátrix és a parciális állapotok deriváltjainak számítására, utóbbi három tagra bontható, ebben az első kettő a diagonálisban lévő blokk-mátrixokhoz és állapotokhoz tartozik, az összetettebb harmadik tag pedig a megelőző bemenetektől függ. Az eredmény a vertikum típusú rendszereket szétcsatolt dinamikájú alakra hozza.

A 7. fejezet vertikum-típusú rendszerek alkalmazási kérdéseivel foglalkozik. Az első kérdéskör a környezeti változások monitorozása ökoszisztémákban konstans és ismert dinamika szerint változó biológiai paraméterek esetén. A problémákat általánosítja halászati modellekre tilalmi zónákkal, melyre két tételt fogalmaz meg (7.2.1.1 és 7.2.1.2), és ezekre alkalmazza a vertikum típusú rendszerek megfigyelésére vonatkozó eredményeit (7.2.2.1. tétel). Részletesebben foglalkozik a megfigyelő tervezésével táplálék hálózatokban (7.3.1 és 7.3.2 tétel), ha a kölcsönhatási mátrix paramétereire meghatározott feltételek teljesülnek. Az utolsó probléma a vegyiparból vett finomítási eljárások vizsgálata, ahol az állapotbecslésre EKF, adaptív EKF és UKF kerül alkalmazásra. A szűrők hatékonysága a kondenzátorban mért pontos sűrűségmérés (etalon) segítségével ítéhető meg.

Formai észrevételek:

Az értekezés magyar nyelven készült, terjedelme 139 oldal. Néhány helyen megfelelő tördeléssel (vessző vagy névelő beiktatása, a hosszú mondatok felbontása rövidebbekre) az olvashatóság növelhető lett volna, megtartva az absztrakt matematikai/rendszerelméleti tárgyalásmód igényességét. Hasonlóan, ki lehetett volna tenni a zárójeleket az exp függvényeknél. Célszerű lett volna táblázatban összefoglalni a jelöléseket az értekezés elején. A központi szerepet játszó elérhetőség, irányíthatóság stb. esetén ki kellett volna hangsúlyozni

a „teljes” jelleget, különben hibás, hogy ez nem függvénye az állapotnak. A gépelési hibák egy részét az olvasó korigáltni tudja, de vannak zavaróak is. Például p. 17: y jobb oldalán kimaradt a kettős szumma előtt a +, p. 88: (5.6) és (5.7) jobb oldalán nem deriváltak kellene, p. 103: (5.45) jobb oldalán elhagyandó $=0$, p. 107: az első determinánsban index és előjel hiba van, p. 121: rossz a rangfeltétel felírása.

Célszerű lett volna a hivatkozásokat két külön listára bontani (téziseket megalapozó saját publikációk és hivatkozások), és az egyes téziseknél külön megadni a tézist megalapozó saját publikációkat.

A tézisek értékelése:

A téziseket az alábbi megfogalmazásban és pontosításokkal tudom elfogadni.

Az 1. tézis az értekezés 2.1 és 2.2 tételeit összegezi és azt mondja ki, hogy LTV rendszerek esetén a *teljes* elérhetőség szükséges és elégséges feltétele a Kalman-féle rangfeltétel és a gerjesztési feltételek együttes teljesülése.

A 2. tézis LPV rendszerek esetén felteszi, hogy a bemenőjel egy konvex U poliéderből veheti fel az értékeit. Ha $A(p(t),t)$ és $B(p(t),t)$ struktúramátrixok esetén létezik a feltételeket kielégítő $u(t)$ irányítás, akkor az lecserélhető egy jól approximáló szakaszonként konstans $v(t)$ irányításra, amelynek értékei az U poliéder csúcaiból valók, továbbá $p(t)$ is lecserélhető egy jól approximáló szakaszonként konstans $g(t)$ paraméterfüggvényre. Speciálisan, ha a p paraméter értékei is egy konvex P poliéderbe esnek és a struktúramátrixok lineárisak p -ben, akkor $p(t)$ is lecserélhető jól approximáló szakaszonként konstans $q(t)$ függvényre, amelynek értékei a P poliéder csúcaiból valók. Az eredményeket az értekezés 4.1 és 4.2 approximációs tételei alapozzák meg. A tézis hasonló a Pontrjagin és társai által megfogalmazott bang-bang elvhez. A Buck-Boost konverterre alkalmazva a feladat analóg a kapcsoló (switching) irányítási problémához.

A 3. tézis arra ad választ, mikor lesz paraméterben lineáris LPV rendszer és konvex paraméterhalmaz esetén az approximáló irányítás irányíthatósági mátrixa invertálható. Ehhez összefüggést ad a poliéder csúcsai által generált Lie-algebra és az azt tartalmazó generált asszociatív algebra között. Ez azt jelenti, hogy perzisztens gerjesztés esetén a paraméterekre bizonyos tiltott algebrai differenciálegyenletek nem teljesülnek. A tézis alapja az értekezés 5.1 és 5.2 tétele. Az időintervallum, ahol az állapotok nem irányíthatók nullába, függ az approximáció finomságától. Az eredmények felhasználják a Riccati-féle differenciálegyenlet és a Kalman-féle rangfeltétel közötti kapcsolatot, Szigeti-Bokor-Edelmayer (1995) eredményeit és a Pommeret-féle mérésfelfogást.

A 4. tézis vertikum típusú rendszerek (az állapotegyenlet mátrixai alsó blokk-háromszög mátrixok) esetén módszert ad az alrendszerek ki-be kapcsolásának modellezésére. Alkalmasan választott transzformációk és Lie-algebra felhasználásával a rendszer szétcsatolt dinamikájú alakra hozható.

Az 5. tézis a vertikum típusú rendszerek alkalmazási lehetőségeit mutatja be környezeti változások monitorozására ökoszisztémákban, halászati modellekre tilalmi zónákkal és állapotmegfigyelő tervezésére táplálék hálózatokban, ha a kölcsönhatási hálózat paramétereire meghatározott feltételek teljesülnek. A mérnöki problémák köréből Miranda-Edelmayer-Molnár (2010) cikkére hivatkozva vizsgálja még a vegyiparból vett finomítási eljárások állapotbecslésének hatékonyságát EKF, adaptív EKF és UKF szűrők alkalmazásakor, ha a kondenzátorban pontos sűrűségmérési eredmények (etalon) állnak rendelkezésre.

Kérdések:

- 1) Az R gyűrűről feltette, hogy kommutatív, míg később a Lie-zárójellel definiált szorzás nem az. Az alapmátrix számításakor A_1, A_2, \dots, A_l szintén nem felcserélhetők. A Wei-Norman felbontás szerint a $\Phi(t, \tau)$ alapmátrix számítható egyszerű mátrix-exponenciálisok szorzataként, de ehhez ismerni kell a $g_i(t, \tau)$ függvényeket a megfelelő Lie-algebra A_1, A_2, \dots, A_l bázisában, amihez viszont meg kell oldani a $g_i(t, \tau)$ -kra vonatkozó differenciálegyenleteket, ami numerikus szempontból eléggé összetett feladat. Létezik-e további egyszerűsítési lehetőség? Mi a valódi haszna a fenti felbontásnak: i) Megalapozza az elméleti eredményeket? ii) Numerikusan is „könnyen” kiértékelhető módszert ad?
- 2) A (7.1.1) rendszer esetén melyek az x_i^* , $i=1,2,3$ egyensúlyi feltételek, és abból hogyan következik A . Hasonlóan, mi a válasz ugyanezen kérdésekre (7.1.1.3) esetén?
- 3) Adja meg a 7.4 pontban tárgyalt finomítási eljárás dinamikus modelljét (kondenzátor, tálcák, reboiler), vagy azt a forrást, ahol a modell és paraméterei elérhetők.
- 4) Adjon egy listát (táblázatot), hogy az egyes tézisekhez mely saját (esetleg társszerzős) publikációk tartoznak az eredeti irodalomjegyzék számozása alapján és mikor jelentek meg. Hol válnak el a saját eredmények más szerzők (Szigeti, Bokor, Miranda, Edelmayer stb.) eredményeitől?

Összefoglalva megállapítom, hogy az értekezés átfogja a jelölt több évtizedes tudományos munkásságának eredményeit. Fontos, a kutatások középpontjában álló rendszertechnikai és irányításelméleti kérdésekkel foglalkozott, és a nemzetközi kutatások figyelembevételével is jelentős új saját eredményeket fogalmazott meg a lineáris paraméterváltozós és kapcsolt rendszerek differenciál-algebrai elvű irányítása területén, melyeket külföldi és hazai társszerzőkkel közösen rangos konferenciákon és folyóiratokban publikált, és amelyekre több rangos külföldi hivatkozás történt.

Az értekezés hiteles adatokat tartalmaz. A téziseket (korábbi észrevételeim fenntartása mellett) a fenti megfogalmazásban elfogadom. Az értekezés a korábbi matematikai tudományok kandidátusa (CSc) fokozat megszerzését követően jelentős eredeti tudományos eredménnyel gyarapította az irányításelméletet, hozzájárult a tudományág fejlődéséhez, ezért az értekezés elfogadását, a nyilvános vita kifizetését és sikeres védelem esetén az MTA doktora fokozat odaítélését javaslom a műszaki tudományok területén.

Budapest, 2017. július 4.

Lantos Béla
a műszaki tudomány (MTA) doktora