

## OPPONENSI VÉLEMÉNY

**Szabó Zoltán**

Kapcsolt és LPV rendszerek irányítása geometriai megközelítésben

című MTA doktori értekezésének vitájához

### **Témaválasztás, motivációk**

Szabó Zoltán az MTA SZTAKI Keviczky László és Bokor József akadémikusok által fémjelzett Rendszer- és Irányításelméleti Tudományos Iskolában nőtt fel. Ez a labor a matematikai rendszerelmélet és az irányításelmélet nemzetközileg is kimagasló kutatóhelye, ahol a matematikai rendszerelmélet valamennyi hagyományos és korszerű elemét, a rendszeranalízis és szintézis problémáinak kutatását nemzetközi mércével mérve is magas szinten művelik. Mindezek alapján kijelenthető, hogy a jelöltnek könnyű dolga volt a témaválasztásnál, hiszen a munkahelyi környezet kellően gazdag inspirációt adott a napjainkban a szakmai érdeklődés homlokterében álló kutatási terület kiválasztására és művelésére.

A “modern” irányításelmélet alapjait, az állapotteret leírástechnikát, valamint a fontosabb alapfogalmakat (irányíthatóság, megfigyelhetőség, stabilizálhatóság, ...) a múlt század hatvanas éveiben dolgozták ki, illetve adták meg. Lineáris időinvariáns rendszerek post-modern vizsgálati módszereinek bevezetése – ide értve a robusztus elemzési és tervezési feladatokat is – a nyolcvanas évekre tehető. Ezen technikák többváltozós, időben változó nemlineáris rendszerekre történő kiterjesztése azonban számos területen máig megoldatlan probléma. A számítástechnika rohamos fejlődése egyre több korábban kezelhetetlen komplexitású feladat megoldásához járul hozzá, s ad lehetőséget garantált, jobb minőségi jellemzőkkel rendelkező szabályozási rendszerek szintézisére.

Szabó Zoltán dolgozatának két karakterisztikus eleme van. Az egyik a vizsgálat tárgya, vagyis az, hogy milyen rendszereket vizsgál; a másik pedig a vizsgálat módszertana.

Az értekezés a többváltozós dinamikus input affin, lineáris differenciál-tartalmazásos (LDI) rendszerek két nagyobb osztályának - a lineáris kapcsolt, valamint a lineáris változó paraméterű rendszerek - vizsgálatával foglalkozik. Ezen rendszerekben az állapotváltozók mozgása egy halmazértékű függvénnyel képezhető le. LPV esetben az LDI-t leképező halmazfüggvény a végrehajtás pillanatában ismert jelek/függvények által parametrizált. Kapcsolt rendszerek esetén pedig az LDI halmaz véges számú részhalmazra bontható, illetve a halmaz szakaszonként állandó függvényekkel karakterizálható. Ezek a rendszerek az LTI és LTV rendszerek általánosításának tekinthetők, s

lehetőséget adnak nemlineáris rendszerek egy széles és a gyakorlatban jól használható osztályának a vizsgálatára.

Az értekezés a fenti rendszerek vizsgálatára a geometriai megközelítést használja. A geometriai módszertan vektor-, al-, kernel és image terekkel, invariáns alterekkel operál, s az irányíthatósági, stabilizálhatósági, elérhetőségi, megfigyelhetőségi és detektálhatósági kérdésekre invariáns alterek formájában adja meg a választ. Az irányítási rendszerek geometriai megközelítésének az alapjait a hatvanas évek végén tették le. A lineáris geometriai irányításelmélet nemlineáris kiterjesztésének első eredményei a 80-as évek elején jelentek meg. A geometriai rendszerelmélet eszközrendszerének a használata az alapvető szabályozásméleti fogalmaknak új megvilágítását és új kezeléstechnikáját adta. A jelölt matematikusi képzettségéhez jól illeszkedik a választott módszertan. Ugyanakkor egy mérnök végzettségű kutató-fejlesztő olvasót szinte sokkolhat az altérkalkulus igen intenzív használata. A dolgozat értékét növelte volna, ha szerző kitért volna a geometriai és az algebrai megközelítés összehasonlítására is.

A dolgozat témaválasztása időszerű. Az értekezésben megoldott tudományos feladatok és az alkalmazott módszerek a kutatás nemzetközi élvonalába tartoznak.

### **Tartalmi áttekintés és értékelés**

Az értekezés érdemi része 97 oldalból áll, amelyet egy 20 oldal terjedelmű melléklet, valamint 9 oldal terjedelmű hivatkozás és 4 és fél oldal terjedelmű publikációs lista követ. A disszertáció többszörösen strukturált. A 12 arab számozású fejezetet 4 latin betűs függelékben elhelyezett fejezet követ, s az ily módon számozott fejezeteket a szerző 5 római számú fejezetre tagolja. Az első négy római tagolás segít az olvasónak, hogy az értekezés új tudományos eredményei között eligazodjon, ugyanakkor a bíráló nem érti, hogy a Függelék miért kapott római 5 számozást.

Az értekezés bevezető fejezete irodalmi áttekintés. A történeti visszatekintés az ókori görögöktől indul, részletesen taglalja James Watt 18. századi fordulatszám szabályozóját, s hamar eljutunk a Kalman által megalapozott modern szabályozásmélethez. A szerző ezután áttekinti azokat a szabályozásméleti megközelítéseket, amelyek alapvető hatással voltak az értekezés kidolgozására. A 2. fejezet tárgyalja a témaválasztás motivációját. Bemutatja, hogy időben változó rendszerek analízise számos érdekes problémát vett fel, az LTV rendszerek vizsgálata az LTI rendszerekhez képes minőségileg összetettebb. A 3.-tól a 10.-ig tartó fejezeteket a szerző 4 részre tagolja, ezek tartalmazzák az értekezésben közölt új tudományos eredményeket. A 3. és 4. fejezetek az irányíthatósággal, az 5. a stabilizálhatósággal, 6. és 7. fejezetek az LPV rendszerek geometriai elméletével, a robusztus invariánsokkal foglalkoznak. A IV. főfejezet a 8., 9. és 10. fejezeteket fogja össze. Ez a rész tárgyalja a III. főfejezetben kidolgozott LPV invariánsok alkalmazási lehetőségét speciális input affin rendszerekre. A szerző a 11. fejezetben foglalja össze a korábbi fejezetekben már kimondott téziseket. A Jelölt az új tudományos eredményeit – melyeket a korábbi fejezetekben 2 lemmában, 20 proposition-ban és 3 corollary-ben fogalmazott meg – 5 tézisben foglalta össze. Érdekes, hogy a tézisek kimondásának sorrendje eltér az értekezés fejezeteinek sorrendjétől, valamint az értekezésben megfogalmazott 23. és 24. proposition-ok nem kerültek a tézisek közé. A 12. fejezet a Következtetések címet viseli. A Függelék négy fejezetben tekinti át az értekezés könnyebb megértéséhez szükséges matematikai hátteret; foglalkozik az LTV rendszerek analízisének

néhány kérdésével, a vektormezők fogalmával, az LTI rendszerek geometriájával, valamint az invariáns disztribúciókkal és kodisztribúciókkal.

Az értekezés angol nyelven készült. A szakmai részek nyelvezete megítélésem szerint jó. (Csak néhány helyen találtam felesleges szóismétléseket.)

Ugyanakkor a bíráló sok esetben úgy érzi magát, hogy egy kvíz játék résztvevője. Ki kell találni, hogy mire gondolhatott a szerző, hogy az egyes művés jelöléseknek mi lehet a szerző által elképzelt jelentése. Az értekezést mindenképpen érdemes lett volna egy jelölésrendszerrel kezdeni. Ez jelentősen megkönnyítette volna a geometriai megközelítésben kevésbé jártas olvasók dolgát. Így nem az olvasónak kellene kitalálnia,

- hogy az értekezés mikor használja az írott és nem írott betűket, valamint a kövéren és nem kövéren szedett jeleket, mit jelölünk dőlt vagy egyenes karakterekkel;
- hogy van-e különbség az italic szedésű  $d$  és nem italic szedésű  $d$  operátor között, illetve hogy a  $d$  egyáltalán operátor-e,
- hogy van-e különbség az írott  $R_{A+B}$  és az írott  $R_{(A+B)}$  között, vagy a 19. oldalon mindehhez hogyan kapcsolódik  $R$  felső index csillag, alsó index  $A, B$ ;
- hogy mit jelent az értekezésben sokszor előforduló kis kövér  $j$  eleme kis kövér  $j$  jelölés;
- hogy mi a jelentése annak, ha egy változó kitevőjében a  $-1$  kapcsos zárójelek között szerepel; van-e jelentősége annak, hogy a téziszfüzetben és az értekezés 11. fejezetében ugyanazon képleteknél a kapcsos zárójel már nem szerepel, bír-e jelentőséggel, hogy ugyanaz a típusú változó (nem feltétlenül invertálható mátrix) a 82. oldalon pedig a “ $-r$ ”-edik hatványra emelkedik...
- Szerencsés lett volna a zárójelhasználat (kerek, szögletes, kapcsos, kisebb-nagyobb jelek) bevezetése is, az olvasó nem mindenütt érzi ezen jelek következetes használatát....

A Jelölt az értekezésben azzal foglalkozik, hogy a lineáris geometriai rendszerelmélet határai hogyan terjeszthetők ki hibrid nemlineáris rendszerekre. Ezen a területen a jelölt nemzetközi mércével mérve is új tudományos eredményeket ért el. Az 1. tézisben a jelölt lineáris kapcsolt rendszerek irányíthatósági feltételeivel foglalkozott. Megmutatta, hogy a rendszer irányíthatóságának feltétele, hogy az elérhetőségi altér rangja megegyezzen a rendszer fokszámával. Bebizonyította, hogy a kapcsolt rendszer tetszőleges állapotból véges kapcsolási szekvenciával a kapcsolások között állandó bemenőjelekkel nullába vihető. Vizsgálta nem-negatív bemenetű kapcsolt rendszerek esetén az irányíthatóság feltételeit. Algoritmust dolgozott ki lineáris kapcsolt rendszerek irányíthatósági tulajdonságának ellenőrzésére. Az 1. tézisben megfogalmazott tudományos eredményeket – többek között - az Automatica és European Journal of Control folyóiratokban publikálta.

A 2. téziscsoport a lineáris kapcsolt rendszerek stabilizálhatóságának kérdésével foglalkozik. Vagyis azzal, hogy az állapotváltozók ismeretében lehet-e olyan visszacsatolást találni, amely segítségével a rendszer tetszőleges kezdeti állapotból nulla (nyugalmi) állapotba megy át. A Jelölt megmutatta, hogy az irányítható lineáris kapcsolt rendszerek a kapcsolási módtól függő lineáris állapot-visszacsatolással stabilizálhatóak. A tézis második része arra keresi a választ, hogy hogyan lehet megtalálni az állapotfüggő visszacsatolást. Az értekezés megadja diszkrét idejű bizonytalanságot is tartalmazó rendszerleírás esetén a visszacsatolási mátrixok számításának az algoritmusát. Az

algoritmus mátrix egyenlőtlenségek kezelését igényli. A rendszerleírásnak ezen váltása megtöri az értekezés logikus felépítését. Az értekezésnek csak ezen alfejezetében találkozhatunk diszkrét leírással, ezen túlmenően a bizonytalanság bevezetése egyébként sem tekinthető kellően előkészítettnek. A bíráló jobban örült volna, ha - a korábbi fejezetek logikáját követve - a folytonos rendszerleírás melletti stabilizálhatósági feladat megoldását látja ezen a helyen.

Az értekezés – véleményem szerinti – legértékesebb része a 3. tézis csoport. Ez a téziscsoport a lineáris változó paraméterű rendszerek geometriai rendszerelméletének kidolgozását tartalmazza, általánosítja a lineáris időinvariáns rendszerek elméletében használt invariáns altereket LPV rendszerekre, s megadja az irányíthatósággal és megfigyelhetőséggel kapcsolatos invariáns alterek meghatározásának az algoritmusát abban az esetben, ha a rendszerleírásban a paraméterfüggés affin. Az eredmények – többek között – az IEEE Transactions on Automatic Control-ban jelentek meg. Az olvasó ugyanakkor sajnálja, hogy a fejezet nem tartalmaz egyetlen demonstratív példát sem.

A 4. téziscsoport az LPV rendszerek dinamikus invertálása címet viseli. A szerző olyan bal, illetve jobb oldali rendszer inverzeket keres, amelyek a becslési és irányítási feladatok megoldását támogatják. Leegyszerűsítve a jobb oldali invertálhatóság például azt jelenti, hogy egy tetszőleges kimeneti függvényhez található olyan bemenőjel, amely segítségével a kívánt kimenőjel előáll. A 4. tézis megadja ezen inverzek létezésének geometriai rendszerelméleti feltételeit, továbbá ezen inverzek segítségével algoritmust ad ismeretlen bemenőjelek megfigyelésére, valamint követő szabályozó tervezésére.

A 9.1 - 9.3 fejezetekkel kapcsolatban a bírálónak számos fenntartása van. A 9.1 fejezet és a 9.1 ábra nem konzisztens. A 9.1 ábrán megjelenik szaggatott vonallal a „stabilizing controller” blokk, ezzel kapcsolatosan a szöveges részben nem találtam utalást. Az olvasó nem érti, hogy a főbb jelhatások az ábrán miért nincsenek jelölve. A szabályozó függ a  $\xi$  állapotváltozóktól is. A szabályozóban található  $\eta$  alrendszer nem biztosítja a rendszer visszacsatolásos linearizálását. A 9.1 fejezetben nincs szó az alapjel követéséről. Az ábrán megjelenik az  $y_d$  alapjel, s az ehhez kapcsolódó irányítási alrendszer. Valós alkalmazásoknál nem az alapjel  $r$ -edik deriváltját szokás megadni. Ez elméletileg lehet, hogy szépnek tűnik, de a gyakorlatban nem szokásos (például egy egységugrás jellegű alapjelváltozást nem szokás így előállítani).

A bíráló fenntartásai a 9.2 ábrán bemutatott irányítási stratégiára is vonatkoznak. A bíráló valószínűleg valamint teljesen félreért a 78.-80. oldalak környékén, illetve nem látja az átalakítások gyakorlati jelentőségét. A jelölt által bemutatott szabályozási stratégia a kimenőjelek relatív fokszám szerinti deriváltjait is felhasználja. Könnyen belátható, hogy már egyszerű egy egy-bemenetű és egy-kimenetű egytárolós állandó paraméterű lineáris dinamikus rendszerre is a 9.2 és 9.3 fejezetben bemutatott szabályozó *nem realizálható* visszacsatolást tartalmaz. A 9.2 ábra jelöléstechnikai szempontjából további érdekességeket is takar, van olyan blokk, amelynek a kimenete nem függ a bemenetétől. A 9.3 fejezetben zavaró, hogy a sapkás jelek nincsenek definiálva. A 82. oldalon lévő példában megjelenik  $v$  sapka. Ilyen jel a fejezetben korábban nem szerepelt.

Az LPV rendszerek invertálásán alapú szabályozótervezés során az olvasó kíváncsi lett volna

- a zérus dinamika kérdésének részletesebb taglalására;
- hogy a folyamat bemenőjele hogyan alakul, a szabályozási algoritmus mekkora túlvezérlést eredményez, hiszen minden szabályozás esetén kezelni kell a bemenőjel telítéseit;

- hogy a kimenőjelre szuperponálódó additív zaj - a kimenőjelek 1-től  $r_1$ -ig terjedő deriváltjainak előállítási kényszere következtében - hogyan befolyásolja a szabályozás minőségét;
- hogyan lehet mintavételes rendszerre használni az algoritmust, mivel másodrendűnél magasabb fokszámú lineáris dinamikus rendszerek esetén a belső dinamika labilis...

Az 5. téziscsoport az 1. és a 2. tézisben is vizsgált lineáris kapcsolt rendszerekkel, pontosabban ezek egy gyakorlatban fontos alesetével, a két működési módussal rendelkező bimodális rendszerekkel foglalkozik. A Jelölt ezen rendszereknél az irányíthatóság és stabilizálhatóság kérdésének a meghatározására az 1. és a 2. tézisben megfogalmazott eljárásnál egyszerűbb módszert dolgozott ki. Érdekes lett volna egy egyszerű példán keresztül a két megoldás közötti különbséget demonstrálni.

Kapcsolt rendszerek esetén az olvasó elgondolkozik azon, hogy a reléket tartalmazó rendszerek esetén esetlegesen fellépő prelegés jelensége itt is felléphet-e. Továbbá, hogy az értekezésben bemutatott algoritmusok kiterjeszthetők-e a módusok között finomabb, pl. adott tartományban lineárisan változó átmenetek kezelésére, hiszen számos olyan folyamat létezik, ahol nem ugrásszerűen változik a rendszer dinamikája.

Néhány lényegeset nem érintő megjegyzés:

- Az értekezésben több zavaró elírás található. Pl. az értekezés 99. és a tézisfüzet 15. oldalán az  $y$  hullám definiálásának jobb oldala hibás, a 47. oldalon a példában  $B_2$  nincs megadva,...
- Műszaki jellegű értekezésben nem tartom szerencsésnek az olyan mondatokat, hogy "alkalmas" ... állapot-visszacsatolással ..., "suitable" sampling rate, "some" measurement noise also considered... Ezek konkrétan megadhatók lettek volna.
- A becült és a valós jeleket célszerű azonos léptékben ábrázolni (pl. a 9.4 ábra bal és jobb oldalán az "applied and reconstructed inputs" jelek).
- Az irodalomban általában (A,C) invariáns altérrel találkoztam, és nem (C,A) invariánssal. (A függelékben (A,C) található, de az értekezésben (C,A).)

Gyakran hallható állítás, hogy az irányítástechnikában hatalmas szakadék tátong az elmélet és gyakorlat között. A jelen értekezés az elméleti irányt erősíti. A matematikai precizitású tárgyalásmód mellett érdemes lett volna az eredmények mérnöki jellegű interpretációjára is kitérni. Egy műszaki tudományok területén beadott értekezésben szerencsés lett volna nem az olvasóra bízni, hogy ezt az interpretációt megtegye. A szerző persze hivatkozhat a terjedelmi korlátokra, bizonyára lehetett volna helyet találni arra is, hogy a Jelölt a dolgozatában is bemutassa, hogy az elméleti eredményeket hogyan alkalmazta a gyakorlatban. Az értekezés csak hivatkozás szintjén utal az elméleti eredmények gyakorlati alkalmazásaira.

A kutatás nemzetközi beágyazottsága rendkívül jó. A jelölt értekezésében megfogalmazott eredményeit számos rangos, a szakma meghatározó (IEEE Trans. on AC, Automatica, European Journal of Control, Control Engineering Practice) folyóiratában publikálta. Az elért eredményekről a szerző beszámolt a szabályozástechnika legrangosabb fórumain (IFAC, CDC, ACC, ECC...). A kutatást

hazai szinten támogatta az OTKA, az NKFP, a Bolyai ösztöndíj, nemzetközi szinten pedig NASA, NSF, illetve az európai EOARD.

### **Összefoglaló értékelés**

Összefoglalóan megállapíthatom, hogy a szerző igen értékes munkát végzett és jelentős önálló tudományos eredményeket ért el a geometriai rendszerelmélet területén. Az értekezés kimagasló publikációs háttérrel rendelkező tudományos alkotás, a fentebb értékelt eredmények alapján meggyőzően bizonyítja a Jelölt magas színvonalú tudományos alkotó készségét igen korszerű és bonyolult tudományos feladatok megoldásában. A pályázó egyértelműen igazolta dolgozatával, hogy ismeretei a bemutatott kutatási területen kiemelkedőek.

*A disszertációban megfogalmazott téziseket (a Proposition 21 és 22 értekezésben megfogalmazott formájától eltekintve) önálló, új tudományos eredményként értékelem, amelyek megfelelők az MTA doktori cím megszerzéséhez, és ennek megfelelően a nyilvános védelem kitűzését javaslom.*

*Az elért tudományos eredmények, valamint az értekezés és publikációk minősége alapján a szerző nem hagy kétséget afelől, hogy megfelel az MTA doktori cím elérésével szemben támasztott követelményeknek, amelynek odaítélését feltétlenül támogatom.*

Budapest, 2011. január

Vajk István

egyetemi tanár, az MTA doktora