

**Dr. Németh Balázs**

# ***Analysis and Synthesis Methods for the Optimal Design of Control Systems in Automated Vehicles***

*Analízis és szintézis módszerek automatizált járművek irányítórendszereinek optimális tervezéséhez*

**c. MTA doktori értekezésének bírálata**

## **1. Témaválasztás és az eredmények helye a tudományban**

---

Napjainkban a szabályozáseleméleti kutatásoknak az egyik legintenzívebb gyakorlati felhasználója a járműipar, és azon belül is kiemelhetők az autonóm járművek, így a témaválasztás időszzerűsége és jelentősége nem kérdőjelezhető meg.

Már egy PhD dolgozat esetén is, de egy MTA doktori disszertáció kapcsán különösen fontos azt megvizsgálni, hogy a disszertáció témája miként illeszkedik az aktuális nemzetközi trendekbe, így szükséges egy kitekintés. Ugyanakkor bírálóként nem tisztem, hogy egy state of the art leírást készítsenek, ezért egy részletes elemzés helyett néhány olyan konferencia keynote előadást hívok segítségül, amelyek rá tudnak világítani Németh Balázs dolgozatának jelentőségére.

Az első üzenet Botzheim Jánostól az ELTE Mesterséges Intelligencia Tanszék vezetőjétől származik. Egy helyi konferencián animáció segítségével mutatta be, hogy először az akadályok között csetlő-botló robot egy gépitanulási algoritmus segítségével hogyan tanult meg magabiztosan lépkedni. Az előadást követő vitában kiderült, hogy ő egy heurisztikusan megválasztott, mérnöki szempontból bizonyos elemeiben megkérdőjelezhető fitness functiont használt a betanításhoz. Ez persze semmit sem von le az érdemeiből, hiszen ő az algoritmus fejlesztéssel foglalkozik. Botzheim Jánostól függetlenül, akit egy nagyon kiváló gépi tanulási algoritmus fejlesztőnek tartok, létezik az a vélekedés, hogy adjatok egy stabil fitness functiont, és én kifordítom sarkaiból a világot (Arkhimédész után szabadon). Ahogy Arkhimédész sem talált egy fix pontot, úgy kérdéses, hogy egy jó fitness function minden problémánkat meg tudja-e oldani, arról nem is beszélve, hogy mennyire vannak elméleti garanciák stabilitásra vagy konvergenciára. Mind ettől függetlenül érdemes a gépitanulási algoritmusokat alkalmazni a mérnöki munkában, mert vélhetően egyre több rutin feladatot meg tud majd oldani helyettünk ahogy **a gépitanulási szakemberek egyre hatékonyabb algoritmusokat adnak át mérnököknek, amelyeket ők ugyanúgy eszközként használnak, mint pl. a differenciálegyenleteket megoldó szoftvereket. Viszont az új eszközök használatával a mérnöki munka egyre magasabb absztrakciós szintre léphet, amely egyre mélyebb matematika használatát igényli. Erre a trendre ez a disszertáció jó példa.**

Így jogosan merül fel az a kérdés, hogy a nemzetközi szakirodalomban hol találkozhatunk olyan példákat, ahol a robusztus irányítás kiegészül tanulási algoritmusokkal. Itt elsőként Jianwei Zhang professzor keynote előadását említem meg, amely az IEEE Industrial Electronics Society kb. 1000 fővel megrendezett 2023. évi nagy konferenciáján októberben hangzott el, Robust robot cognition and control driven by large multimodal data and models címmel. Az előadás üzenete bizonyos szempontból hasonló volt a disszertáció üzenetéhez, de alapvetően a kognitív robotikával foglalkozott és ennek kapcsán állította, hogy az adat vezérelt módszerek számítási igénye nagyon nagy, ezért nem vagy korlátozottan implementálhatók, miközben a legtöbb modell alapú megközelítés nem tud mit kezdeni olyan fogalmakkal, mint ember-gép interakció vagy robotok viselkedése, ebbe beleértve egy könnyed mozgást sugárzó robot járást, amely a helyváltoztatáson túl mást is közvetíteni kíván. Még erősebb példaként megemlíthető a balettozó robot. Az ilyen robotokhoz tartozó szabályozási feladatok nem oldhatók meg tisztán modell alapú megközelítésben. A kézenfekvő megoldás, a modell alapú módszerek kombinálása a tanulás alapú módszerekkel. **Ez a keynote előadás fontos, időszerű és követendő trendként határozta meg azt, hogy a modell alapú szabályozási módszereket tanulás alapú módszerekkel kell kombinálni.** A robotikai alkalmazások több tekintetben más megközelítésűek, mint ennek a disszertációnak a megközelítése. **Leegyszerűsítve Németh Baláznál nem a kognitív jelenségek modellezésére szolgál a tanuló ágens, hanem teljes mértékben a robusztus szabályozás része marad.** A teljes képhez az is hozzátartozik, hogy az irodalomban van olyan példa, ahol kifejezetten robusztus szabályozás eszköztárába emelik be a gépi tanulási ágens, de ez a publikáció hivatalosan a nyáron, a disszertáció leadása után jelent meg.

A következő üzenet bizonyos tekintetben ellentétes irányból közelíti meg a problémát és Frank Allgöwe professzortól származik, aki az idei ECC konferencián a következőt állította, ahol én nem voltam jelen, és az üzenet csak áttételesen jutott el hozzám, de a témához szoros kapcsolódása miatt megpróbálom idézni: „*A szabályozó rendszerekben a reinforcement learning típusú megoldások csillaga immáron leáldozott, felválthatjuk az adat alapú MPC megoldásokkal, amelyek elméleti garanciákat tudnak adni a működésre.*” (ld. MPC goes data: A framework for data-based Model Predictive Control with system theoretical guarantees, című keynote előadás, <https://ecc23.eucaecc.org/plenary-lectures/#Lecture1>). Itt van egy másik burkolt kérdés, **vajon az adat alapú MPC algoritmusok milyen körben oldanak meg minden szabályozásméleti problémát. Konkrétan hol maradt helye a modell alapú robusztus szabályozásokon? A tézisekhez kapcsolódó bizonyos kérdéseket ez a keynote előadás motiválta.**

Az előző pontban felvetett kérdés kapcsán létező jelenségként mindenképp meg kell említeni, hogy egyre többen fordulnak el a robusztus szabályozásmélettől. Magát a jelenséget nem kívánom sem elemezni, sem minősíteni. Csak azért ismertetem, mert ez mindenképp egy nem elhanyagolható

körben létező vélekedés, amellyel szemben a disszertáció csattanós választ tud adni, továbbá egy friss élményemhez és egy keynote előadáshoz kapcsolódik. Szintén az IEEE IECON'23 konferencián több technikai bizottság választott elnököt. Az Education in Engineering and Industrial Technologies technikai bizottság egyik elnökjelöltje úgy mutatta be magát, hogy ő sokáig szabályozásemeléttel foglalkozott, de kiábrándult abból, mert szerinte ugyan az alkalmazásban sok újdonság van, de magában az elméletben régen nem történt semmilyen igazi áttörés, szerinte, a klasszikus  $H_\infty$  típusú lineáris mátrixegyenlőtlenség (LMI) köszön mindenütt vissza és ő ezért fordult a technológiák és az oktatást felé. Ezt követően Guang-Ren Duan professzor a Fully Actuated System Approach for Control---An introduction címmel tartott keynote előadást. Az előadás után az újonnan megválasztott oktatás TC alelnök igazolva látta azt az állítását, miszerint a szabályozások területén nincs semmi, ami elméletileg is új lenne, csak a régi dolgoknak adnak új neveket és ezt a szünetben hangosan mondogatta. Ezen több professzor elkezdett vitatkozni, többen voltak hasonló véleményen, voltak, akik ezt vitatták, szükségszerűen elhangzott a kérdés, „*na mondjatok egy példát a közelmúltból, ahol valami elméletileg is új született*”. Ekkor hirtelen az jutott eszembe és azt mondtam, hogy Magyarországon tevékenykedik egy fiatal kutató, Németh Balázs, aki megmaradt a klasszikusnak mondható robusztus szabályozáseméleti szakembernek **és a szokásos modell alapú robusztus szabályozáseméleti keretbe beemelte a gépitanulást, de hangsúlyozottan egy új eszközként, illetve kiegészítő adat vezérelt ágként, és ennek az új eszköznek a megjelenését a hagyományos kereten belül, én egy fontos elméleti újdonságnak tekintem.** Ezt valamilyen szinten a vitapartnerek elfogadták, így **kijelenthető, hogy Németh Balázs kutatásainak jelentőségét (a cikkein túlmenően) egy nemzetközi szinten egy kifejezetten szkeptikus közeg is elismerte.**

## **2. Tartalmi ismertetés és formai megjegyzések**

A dolgozat 9 fejezetre osztva 170 számozott oldalból áll. Az első bevezető fejezet ismerteti a dolgozat motivációját, tárgyát és felépítését. A bevezetés után a logikailag összetartozó fejezeteket öt részre osztja, a hatodik részben jelenik meg a hivatkozási jegyzék és ezt követi a három pontra osztott függelék. A fejezetek egy világosan átlátható logika mentén követik egymást. A szekvenciális felépítésen túlmenően a felépítését bemutató alfejezetben egy folyamatábra szemlélteti a dolgozat mélyebb összefüggéseit. Az I. részbe sorolt 2. fejezet mutatja be azt a robusztus szabályozási módszert és működési garanciákat nyújtó tervezési keretrendszert, amely az egész dolgozaton átível.

A II. rész az egyes járművek energiaoptimális szabályozásának kialakítására összpontosít. A tervezési folyamatot két módszerrel mutatja be. Ez a rész alapozza meg az első tézist. A 3. fejezetben egy prediktív szabályozás tervezési módszert javasol, amelynek nemcsak az egyedi tervezésben alkalmazható, hanem a III. és IV. részben megjelenő több jármű szabályozásában (5. fejezet) és a forgalom elemzésében (7. fejezet). Ezen túlmenően a II. részhez tartozó 4. fejezet bemutat egy

másik tervezési módszert a robusztus keretrendszert és teljesítménygaranciákat használó egyedi járművekre, amely a 2. tézishez vezet. Több autonóm jármű esetén a szabályozó biztonságkritikus kölcsönhatásait fegyelembe vevő tervezésének gyakorlati alkalmazását a III. rész mutatja be. Ennek a résznek a fejezetei a kereszteződések forgatókönyveinek prediktív tempomat módszerrel (5. fejezet), illetve tanulás alapú megközelítéssel (6. fejezet) történő kezelésével foglalkoznak. Ehhez a részhez tartozik a 3. tézis.

Végül a forgalomban lévő automatizált járművek összehangolt irányításának kihívásaival és a 4. tézis megalapozásával a IV. rész foglalkozik. A forgalmi áramlás dinamikája és az energiaoptimalis sebességtartó automatika közötti összefüggések leírására szolgáló makroszkopikus modellt a 7. fejezet mutatja be. Ezen eredmények felhasználásával a 8. fejezetben az automatizált járművek koordinálására szolgáló halmazalapú elemzési és szabályozó tervezési módszereket javasol.

Az új tudományos eredményeket, az értekezés következményeit, a jövőbeni célokat és a további kihívásokat az V. részben található 9. fejezet foglalja össze. Így az érdemi rész 116 oldal, és ami ide nem fért bele, néhány kiegészítő szimuláció és definíció, az átkerült a függelékbe, így jött össze a 170 oldal.

### 3. A tézisek értékelése

---

#### 1. Tézis

Elméleti szempontból ez a disszertáció legerősebb tézise, a legfőbb erénye a strukturált felépítésben rejlik, amelynek mentén az egyes blokkok egymástól lényegében függetlenül, vagy csak kevés paraméter összefüggése alapján tervezhetők és implementálhatók. Összehasonlításként:

- A hasonló megoldást adó MPC típusú megközelítések ezzel szemben egy optimalizálási feladatot írnak fel, amelynek bonyolultabb, az implementációja is összetettebb.
- Az irodalomban található olyan robusztus, konkrétan  $H_\infty$  szabályozás<sup>1</sup>, ahol az adat közvetlenül megjelenik a robusztus irányítás tervezésében LMI-k formájában és ezzel még bonyolultabb a tervezés.

Egy másik fő érdeme e tézisnek, hogy minden learning jellege mellett mindazonáltal robusztus irányítás marad - azaz a hagyományos modell alapú megoldás bővült úgy, hogy az a mai, új típusú feladatok szemléletéhez illeszkedik. A klasszikus model-based robust control megoldások kezdnek háttérbe szorulni, ez abban mindenképp egy olyan vérfrissítés, amely segít abban, hogy át tudjuk annak érdemeit örökíteni a jövőbe.

Ez a tézis megérdemel a disszertációban leírtaknál mélyebb elemzést és összehasonlítást más módszerekkel a tézis jelentőségének bemutatására.

---

<sup>1</sup> J. Berberich, C. W. Scherer and F. Allgöwer, "Combining Prior Knowledge and Data for Robust Controller Design," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 68, no. 8, pp. 4618-4633, Aug. 2023, doi: 10.1109/TAC.2022.3209342.

### **Kérdések:**

**A javasolt keretrendszerben az újdonság a felügyelő algoritmus, amely a robusztus tervezésben az adatokat egy bizonytalansági tényezőként jeleníti meg és bizonyos mértékig az MPC-hez hasonló optimalizálást valósít meg.**

- **Milyen esetekben lehet előnyös a javasolt módszer bizonyos szokásos MPC alapú módszerrel összevetve? Ez a kérdés akár nagyon messze vezethet, itt elegendő lenne néhány konkrét példát bemutatni.**
- **A felügyelő algoritmusban alkalmazott optimalizálás kiterjeszhető-e egy multi fidelity optimalizálással, amely a két ágens jellegének megbízhatóságát (felbontási pontosságát) is figyelembe veszi, különös tekintettel arra, hogy a géptanuláshoz mennyi és milyen minőségű adat áll rendelkezésre?**

### **2. Tézis**

A 2. tézis lényege az, hogy az első tézis keretrendszerének használhatóságát egy jármű sebességtervezési feladatán keresztül mutatja be, amelyet valós járművön, ipari projektben is alkalmaztak. Ez is a robusztus keretrendszerbe illeszkedik és hatékonyan lehet vele csökkenteni a jármű energiafelhasználását. Ennek oka, hogy figyelembe veszi a jármű előtt lévő útviszonyokat (domborzat, lokális forgalom, sebességkorlátozások). Erre a problémára is vannak MPC típusú megoldások, amelyek attól „szenvednek”, hogy számításigényük magas. Az alapvető újdonság, hogy itt nincs szükség egy összetett szabályozás kialakítására, hanem egy sebességtervező réteg a járműszintű irányítás fölé van helyezve.

### **Kérdések:**

- **Villamos hajtások energiafelhasználása esetén fontos kérdésnek tartom a visszatáplálást, amely számos technológiai kérdést vet fel. Hogyan vehető figyelembe a visszatáplálás, illetve az ezekhez kapcsolódó technológiai korlátozások?**
- **A jármű miként tud alkalmazkodni nem csak az előtte haladó, hanem akár a mögötte/mellette/másik sávban haladó járműhöz?**

### **3. Tézis**

A 3. tézis abban az értelemben jelent tovább lépést a 2. tézishoz képest, hogy javasolt keretrendszerben nem egy, hanem több jármű jelenik meg és egy kereszteződési eset példáján mutatja meg, hogyan lehet a kidolgozott keretrendszerben koordinálni a járművek mozgását.

#### Kérdések:

- A kereszteződésen túl más forgalmi helyzetben pl. körforgalomra is alkalmazható-e a módszer?
- Sok esetben kereszteződések, különösen körforgalmak olyan közel vannak egymáshoz, hogy nem lehet azokat egymástól függetlenül vizsgálni. Mennyire terjeszthető ki a módszer ilyen esetekre is?

#### 4. Tézis

A 4. tézis az előbbi problémakört még nagyobb léptékben vizsgálja, a forgalmi modellek és jellemzők szintjén kezeli. Ebben nagyszámú járművön, közlekedés-szimulátorban implementálva elemezi a megoldás hatékonyságát. A makroszkopikus szintű elemzések üzenete az, hogy képesek lehetünk úgy összehangolni az egyedi szintű járművek irányítását, hogy az a globális forgalmi jellemzőket javítja, de vélhetőleg terjedelmi okokból néhány kérdés nyitott maradt.

#### Kérdések

- A tanulási megoldások ennél a nagyobb léptékű problémánál hogyan alkalmazhatók?
- Hogyan tehető hatékonyabbá a forgalom jövőbeli predikciója?

#### 4. Összefoglalás

---

Ha a disszertációt általánosságban kellene jellemezni, akkor először a letisztultság jut eszembe, majd az elmélet és gyakorlat kiegyensúlyozottsága. Ugyanúgy könnyedén bánik a matematikával, mint a gyakorlati problémákkal. Azt gondolom, hogy bírálóként nagyon sokat tanultam ebből a dolgozatból és nagyon értékes munkának tartom. A dolgozat 170 nagyon tartalmas oldalból áll, nincsenek felesleges üresjáratok, amelyek akár kihagyhatók lettek volna, és nincs kétségem Németh Balázs további eredményeket és tartalmas oldalakat is tudott volna írni, de ennyi is elég annak bizonyítására, hogy méltó az MTA Doktora címre.

**Mind a négy tézist elfogadom a szerző által megalkotott új tudományos eredménynek. Javaslom a nyilvános védés megtartását.**

Budapest, 2023. november 7.



Korondi Péter

egyetemi tanár, az MTA doktora

Debreceni Egyetem, Mechatronika és Villamosmérnöki Tanszék