

# Opponensi bírálat

Németh Balázs

## “ANALYSIS AND SYNTHESIS METHODS FOR THE OPTIMAL DESIGN OF CONTROL SYSTEMS IN AUTOMATED VEHICLES”

### c. doktori értekezéséről

Készítette:

Molnár Sándor

MTA doktora

2023. október. 10.

#### 1. A témaválasztás aktualitása tudományos és alkalmazhatósági szempontok alapján

A doktori értekezés témája optimális irányítások tervezése automatizált járművek irányítórendszerei vonatkozásában. Az értekezésben közölt módszertani eredmény túlmutat a klasszikus irányításmélet területén, az elmúlt tíz évben elért eredményeken alapul és a kutatás számára jelenlegi egyik fontos kihívást jelentő problémakörre ad megoldást. Ez a problémakör a nem hagyományos, tanulási algoritmusokat tartalmazó irányítórendszerek minőségi jellemzőire (performanciáira) vonatkozó garanciális kérdés, amelynek kezelésére az értekezés önálló, saját új eredményt mutat be. A dolgozat a magas szintű elméleti eredmények alkalmazhatóságát az automatizált járművek területén mutatja meg, melyen keresztül megoldási lehetőségeket ad az aktuális kihívásokra. Az eredmények alkalmazhatósága nagy fontosságú a hazai járműipari kutatás-fejlesztési-innovációs tevékenység szempontjából.

#### 2. Az értekezésben használt módszertan értékelése

Az értekezésben bemutatott kutatási eredmények szempontjából kiemelten fontos a robusztus, illetve a Lineáris Változó Paraméterű (LPV) irányítástervezési módszerek alkalmazása. Figyelembe véve, hogy a Jelölt kutatóhelye (HUN-REN SZTAKI, Rendszer és Irányításméleti Kutatólaboratórium) hosszú évek óta nemzetközi szinten jelentős szerepet tölt be ezen irányításméleti módszerek elméleti és gyakorlati alkalmazási eredményeinek gyarapításában, a Jelölt jó alapokra építkezhetett munkája során. Ennek megfelelően a dolgozatban bemutatott új módszertan („2. *Robust control design frameworks for ensuring performance requirements*”) hatékony és alkotó módon, önálló gondolatokkal épít a korábban a környezetében elért eredményekre. A Jelölt az irodalomban elérhető további eredményekről is részletes áttekintést ad, valamint kellő matematikai megalapozással mutatja be az optimális irányítás megtervezéséhez vezető formalizálási lépéseket, illetve az optimum probléma megoldását.

Kifejezetten az automatizált járművek optimális mozgásprofil tervezésére a Jelölt egy önálló, új módszert mutat be, amelynek eredményét beleilleszti az előzetesen kidolgozott robusztus és LPV irányítási struktúrába („4. *Performance guaranteed energy-optimal cruise control for automated vehicles*”). A mozgástervezési módszertani eredmény a korlátozások melletti kvadratikus optimalizálás matematikai hátterére épít, amelyre nézve – a különböző járműirányítási szempontok szerint – súlyozási stratégiát és megoldási eljárást ad. A módszertan gyakorlati oldalának szempontjából lényeges kiemelni, hogy a Jelölt a járműirányítást tekintve

olyan mért jelek elérhetőségét feltételezi, amelyek a mai navigációs és térképes-informatikai rendszerek vonatkozásában elérhetőek. A közölt eredmény fontos eleme, hogy figyelembe veszi a mért jelek zajosságát, valamint azt is, hogy a jármű és az infrastrukturális elemek közötti kommunikációs kapcsolat időkésésekkel terhelt lehet.

A több jármű interakciójának kezelésére kidolgozott módszertani eredmény a Jelölt által definiált „supervisor” szintjén mixed-integer típusú optimalizálási eljárásokat tartalmaz („6.1 Formulation of the supervisory strategy for the environment of reinforcement learning”). Habár az ilyen struktúrájú optimalizálási problémák megoldása jellemzően nagy számításigényű, a Jelölt a feladatot úgy alakítja át – kihasználva a konkrét alkalmazási terület sajátosságait – hogy az könnyen formalizálható és gyorsan megoldható optimalizálási feladatok véges sokaságára esik szét. Az így felírt matematikai feladat megoldhatósága kellően megalapozott, a valós időben történő megoldás lehetősége pedig szimulációs eredményekkel alátámasztott.

Az értekezésben közölt szimulációs eredményeket a Jelölt jellemzően a „Matlab” programcsomagnak a megfelelő „Toolbox”-ait alkalmazva alkotta meg. A „7.1 Analysis of the predictive cruise control in the traffic” alfejezet egy nagy pontosságú forgalomszimulációs szimulátort (Vissim) is használ, valamint a „3.3 Implementation of the energy-optimal cruise control in a truck” alfejezet valós mérési eredményekre is támaszkodik.

A módszertani eszköztárat áttekintve megállapítható, hogy a Jelölt az irányításelmélet, valamint a járműirányítás területén elérhető korszerű eszközöket használ mind a matematikai, mind pedig a szimulációs eredmények kidolgozásának vonatkozásában.

### 3. Az értekezés értékelése formai szempontok alapján

A doktori értekezés jól strukturált. A dolgozat jelen felosztásában jól követhető és a Jelölt egyes önálló eredményei logikus sorrendben bomlanak ki az olvasó előtt. A dolgozat öt fő részt („Part”) tartalmaz, ezeken belül kilenc fejezetet („Chapter”), valamint irodalomjegyzéket, egy három fejezetet tartalmazó függelékkel, ábrajegyzéket, táblázatok jegyzékét, illetve a fontosabb rövidítések listáját.

A dolgozat 1. fejezete irodalmi áttekintést és motivációs bevezetést ad az olvasó számára. A Jelölt külön hangsúlyt helyezett az értekezés struktúrájának (ábrával is történő) bemutatására („1.3 Structure of the thesis”), amellyel rámutat az elméleti eredményeket bemutató 2. fejezet és a további fejezetek összefüggéseire.

A „Part I” főfejezet (egyben 2. fejezet) mutatja be a dolgozat alapvető elméleti háttérét: a kidolgozott tervezési struktúrákat, illetve a robusztus és LPV irányítástervezési megoldást.

A „Part II” főfejezet két fejezetben mutatja egyedi automatizált járművek optimális mozgásprofil tervezését. Ebből a 3. fejezet (*Predictive energy-optimal cruise control for automated vehicles*) szintén egy további eredményeket módszertani szempontból megalapozó fejezet, mert ennek eredményeire épít az 5. és a 7. fejezet is. A 4. fejezet a 2. fejezet eredményeit használja arra, hogy a jármű energiahatékony haladása ne eredményezzen ütközést kritikus helyzetekben.

A „Part III” főfejezet szintén két fejezetben emeli az előző főfejezet eredményeit egy közlekedési szempontból magasabb szintre: az 5. fejezet különböző közlekedési interakciók (különösen is a kereszteződés) klasszikus optimalizálási eszközökön alapuló megoldásával foglalkozik, a 6. fejezet pedig a mai kutatási irányokban hangsúlyt kapó gépi tanulás alapú megoldást (jelen kontextusban megerősítéses tanulás) mutat be.

A „Part IV” főfejezet további két fejezetben foglalkozik a bemutatott automatizált irányítástervezési megoldások forgalmi szintű hatásával. A 7. fejezet egy szimulációkra alapozott analízist, illetve az analízis eredményeire építő mozgásprofil tervezést mutat be, amelynek alapján az autópályás forgalomban haladó automatizált járművek mozgása összehangolható egyes forgalmi jellemzők szempontjából. A kapcsolódó 8. fejezet egy új, saját eredményt mutat be, amiben a Jelölt ún. Sum-of-Squares (SoS) feltételekkel halmazszámítási módszert ad a mozgásprofil tervezésére. A megoldás elméleti oldalának érdekessége és egyben erénye, hogy az SoS eljárás különböző változatait jellemzően folytonos idejű rendszerekre dolgozták ki, a Jelölt azonban azt – megfelelő átalakításokkal – a diszkrét idejű közlekedési rendszerre alkalmazza.

A „Part V” főfejezetben végül a jelölt a tézisei mentén összefoglalja fontosabb eredményeit, illetve kitűzi a jövőbeli folytatólagos kutatási irányokat.

Végül, az irodalomjegyzék és további jegyzékek mellett a dolgozat tartalmaz három függelékot, amelyek az öt főrészt egy-egy eredményét egészítik ki, illetve tovább illusztrálják azok hatékonyságát.

Összefoglalva, az értekezés felépítése és logikai rendje megfelel az MTA doktori értekezéstől elvárt szempontoknak. Nyelvezete, stílusa és angolsága a bevett tudományossági követelményeknek eleget tesz.

#### 4. A Jelölt számára megfogalmazott kérdések

A 4. fejezet 4.21-es összefüggésrendszere (supervisor) egy optimalizálási feladatot ír fel a jármű különböző szempontok szerinti optimális sebességének meghatározására nézve. Megítélésem szerint ez a megfogalmazás abból a szempontból egyoldalú, hogy kizárólag a hosszirányú dinamikára fókuszál és nem vesz figyelembe további szempontokat, mint például az utasok kényelmét a megengedhető oldalgyorsulás szempontjából. Habár a supervisor célja elsősorban a biztonsági követelmények betartatása, érdemes lenne az alapvető utaskényelmi tényezőket figyelembe venni. Hogyan lehetséges ezt megtenni a jelenlegi formalizmusban?

Az automatizált járművek prioritizálása fontossá válik, amikor a forgalomban megjelenik egy megkülönböztető jelzést használó jármű. Ebben az esetben a sorrendképzés illetve a koordináció szempontjai értelemszerűen megváltoznak – a Jelölt fogalmaival élve – az elsődleges performancia követelmények sora bővül a jármű elengedésének igényével. Az 5. fejezetben bemutatott koordinációs stratégia hogyan képes kezelni ezt a közlekedési szituációt?

Az értekezés „6. *Learning-based control design with guarantees for safety critical interactions*” fejezete több automatizált jármű mozgásának koordinációját mutatja be, az alkalmazási példa kifejezetten kereszteződési esetekre nézve mutatja be ennek hatékonyságát. A dolgozatban azonban nem számszerűen megjelölt, hogy az irányítási megoldás futtatása mennyi időt vesz igénybe. Hogyan változik ez a számítási idő abban az esetben, ha a kereszteződésben haladó járművek száma elkezd növekedni?

A 8. fejezet egy értékes eredményt mutat be, amelyben az SoS módszer segítségével stabilitási határok kerülnek meghatározásra. A megoldás Lyapunov-függvények felírásán keresztül valósul meg, amely a dolgozatban paraméterfüggő (lásd pl. 8.20 összefüggést). A dolgozatban közölt eredmények vonatkozásában a Lyapunov-függvény milyen formában került meghatározásra, azaz hogyan függ az egyes paraméterektől?

#### 5. Az egyes tézisek értékelése, nyilatkozat a tézisek elfogadásáról

Értekezésében a Jelölt négy tézist fogalmaz meg, amely tézisek mögött egy-egy összefüggő területhez kapcsolódó tudományos eredmények összessége áll.

1. Tézis: A Jelölt egy új robusztus irányítástervezési struktúrát mutat be, amellyel az irányítórendszerrel szemben támasztott performancia kritériumok fennállását garantálja. A tézis két fő eredményt foglal

magában, amelyek egy-egy struktúrához tartozó matematikai formalizmus levezetését mutatják be. Az első eredmény a referencijel képzésére nézve dolgoz ki supervisor algoritmust, valamint egy H-végtelen tervezési eljárást. A második eredmény pedig az irányítás visszacsatolási körében lévő nem hagyományos irányítóelem kezelésére dolgoz ki supervisor algoritmust, valamint egy LPV irányítástervezési eljárást. A tézist egy Springer könyvfejezet, folyóiratcikk (Q1) és nemzetközi konferenciaközlemények támasztják alá. A tézist annak részeredményeivel együtt új, önálló tudományos eredményként fogadom el.

2. Tézis: A Jelölt automatizált járművek számára energia-optimális sebességprofil tervezési módszertant dolgozott ki. A tézis három részeredményt tartalmaz. Az elsőben a Jelölt a jármű előtt lévő útvonalra vonatkozó egyes információk (domborzati viszonyok, sebességkorlátozások, környező járművek mozgásállapotai) segítségével predikciós formalizmust alkotott. A másodikban erre építve felírta az energia-optimális mozgásprofilra vonatkozó optimalizálási feladatot. Ennek hatékonyságát szimulációs környezetben, valamint ipari partnerrel együttműködésben tesztjárművön igazolta. Tézisének harmadik eleme, hogy megoldását az általa kidolgozott performancia garantált struktúrába beépítette. A tézist egy önálló Springer könyv (társszerzővel közösen írva), folyóiratcikk (D1) és nemzetközi konferenciaközlemények támasztják alá. A tézist annak részeredményeivel együtt új, önálló tudományos eredményként fogadom el.

3. Tézis: A Jelölt automatizált járművek biztonságkritikus interakcióinak kezelésére irányítástervezési eljárásokat dolgozott ki. Ezen tézis két fő eredményt tartalmaz. Az első eredmény az energia-optimális mozgástervezési módszertan egy új szemléletű kiterjesztése, amely egy sorrendiséget meghatározó módszertant is magában foglal, valamint képes kezelni a forgalomban jelenlévő emberi szereplők mozgását. A második eredmény a problémát gépi tanulási eljárással kezeli, amelynek eredményességét vegyes közlekedési helyzetek példáján szemléltette a Jelölt. A tézist egy önálló Springer könyv (társszerzővel közösen írva), folyóiratcikk (D1) és nemzetközi konferenciaközlemények támasztják alá. A tézist annak részeredményeivel együtt új, önálló tudományos eredményként fogadom el.

4. Tézis: A Jelölt automatizált járművek forgalomban való mozgásának hatását elemezte, illetve annak optimalizálására nézve tervezési módszertant dolgozott ki. A tézis három fő eredményben bomlik ki. Egyrészt, a Jelölt szimulációra épülő elemzéseket készített, amellyel értékelt az energia-optimális mozgástervezési eljárását autópályás forgalmi helyzetekben. Másrészt új, invariáns halmazokra épülő elemzési eljárást dolgozott ki a forgalom stabilitási határainak meghatározására. Harmadrészt pedig prediktív irányítási módszertant mutatott be az analízis eredményeinek figyelembe vételével, amellyel a járművek mozgása összehangolható a magasabb, közlekedési szintű elvárásoknak megfelelően. A tézist egy önálló Springer könyv (társszerzővel közösen írva), folyóiratcikk (D1, Q1) és nemzetközi konferenciaközlemények támasztják alá. A tézist annak részeredményeivel együtt új, önálló tudományos eredményként fogadom el.

Megjegyzem, hogy a Jelölt impozáns saját publikációit kiegészíti, hogy az értekezés témájában kétszer is nyert Bolyai János Kutatási Ösztöndíjat, Akadémiai Ifjúsági Díjat, valamint a teljesítménygaranciákra vonatkozó kutatás témájában OTKA kutatást vezet.

## 6. Nyilatkozat arról, hogy az értekezés hiteles adatokat tartalmaz-e

Az értekezés téziseinek nemzetközi szintű, rangos helyeken történő közlései, a bemutatott szimulációs és tesztelési eredmények, valamint az értekezés gondos kivitele meggyőzött arról, hogy az értekezés hiteles adatokat tartalmaz.

## 7. Nyilatkozat a nyilvános vita megtartásáról

A fentiek alapján javaslom a nyilvános vita megtartását.

## 8. Javaslat az „MTA doktora” cím odaítéléséről

Értékelésem alapján javaslom – sikeres nyilvános vita esetén – a Jelölt számára az MTA doktora cím odaítélését.