

Opponensi bíráló Tettamanti Tamás
“MODELING, CONTROL, AND SIMULATION BASED
TESTING
FOR AUTOMATED ROAD TRAFFIC” c.
doktori értekezéséről

Készítette: Tar József

2023. február 15.

1. A témaválasztás aktualitásának értékelése gyakorlati és tudományos szempontból

Az értekezés fő témája olyan praktikus módszerek kifejlesztése volt a közlekedésmérnökség területén, amelyek hozzájárulnak a jövő fenntartható közlekedésének megvalósításához az önműködő, autonóm járművek megjelenésével járó új lehetőségek kiaknázásával. Míg kezdetben az egyéni járművek mozgásszabályozásának megvalósítására koncentráltak a kutatók, az utóbbi időben aktuálisává vált az ilyen, egymással és az infrastruktúrával is kommunikálni tudó járművek együtteseinek, csoportjai képességeinek kiaknázása. Folyamatosan izgalmas kérdés, hogy a mikroszkopikus szimulációs szintről kiindulva hogyan modellezhetők a kialakuló forgalom makroszkopikus jellemzői.

2. Az alkalmazott kutatási módszerek értékelése tudományos szempontból

Feladatának megoldásához a Jelölt egy általánosan elfogadottnak tekinthető taxonómiára [SAE J3016 Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems] támaszkodva lát hozzá, melyben *a jármű automatizáltságának különböző szintjei vannak leírva*, hiszen a valós forgalom különböző szintű, képességű eszközök együttműködése jóvoltából alakul ki. Erre vonatkozóan egy 2030-ra vonatkozó becslésre épít, amely megadja, hogy kb. milyen automatizáltságú járművek milyen arányban vesznek majd részt a forgalomban. Az „1.3 Development Trends of Road Vehicles and Transportation” c. fejezetben röviden áttekinti a legfrissebb fejlődési trendeket. Egyértelműen a holisztikus megközelítés híve, mivel nagyobb egységbe szerveződő egyedek együttese olyan készségek megjelenésével jár együtt, amelyekkel az egyedek külön-külön nem rendelkeznek, és a modern szolgáltatások ugyanilyen integrált szemlélet alapján jönnek létre.

A különböző szenzorok jeleinek fúziójára a „2.2.1 Switching Kalman Filter for Travel Time Estimation” c. fejezet a kapcsoló Kalman szűrő használatát javasolja, amelyben a „megfigyelhető rész” tipikusan különböző forrásokból ered. E területen a bizonytalanságok kezelése, valamint a hiányzó mérési adatok temporális pótlása a megfigyelt mozgásból vett becslések alapján kulcsfontosságú.

Ugyancsak célszerű a körforgalommal működő kereszetződések adatainak becslésére vonatkozó mozgó horizontú eljárás. Ez a költséghatékony eljárás a Jelölt egyik saját eredménye.

Fontos, hogy az eredetileg forgalmi adatok mérésére tervezett szenzorok jelei mellett tekintetbe vesz olyan új, modern alternatív lehetőségeket, amelyek nem erre a célra tervezett eszközökből erednek, de mintegy „melléktermékként”, jeleik alkalmasak a forgalom bizonyos jellemzőinek becslésére (pl. mobil telefonok jelei,

flotta menedzselő rendszerek jelei).

A valódi forgalom „digitális ikrének” létrehozásával dolgozó 5. Tézisben bemutatott szabályozás szintén megfelelő eljárás.

A Jelölt modern matematikai eszközöket, pl. a MATLAB különböző csomagjait és a rendelkezésére álló szofisztikált szimulátorokat hatékonyan alkalmazta szimulációk végzésére.

A Jelölt a rendelkezésre álló mérési és becslési technikák kiterjedt és mély elemzését adta meg értekezésében, beleértve a mesterséges intelligenci alkalmazásával elérhető lehetőségeket is.

Összességében megállapítható, hogy a Jelölt a mai technikai színvonalnak megfelelő, releváns és hatékony matematikai és informatikai módszereket alkalmazott a disszertációja tárgyát képező kutatásokban.

3. A doktori értekezés formai értékelése

Az értekezés igen jól strukturált. Tartalmazza az összes fontos elemet (táblázatok, rövidítések jegyzéke, stb.). A bevezető jellegű *Chapter 1* az értekezés első tézise a *Chapter 2* „*Advanced Methods for Road Traffic Measurement and Estimation*” fejezetben jelenik meg.

A 3. fejezet annak vizsgálatára koncentrál, hogy miképp befolyásolja magát a forgalmat és a klasszikus forgalomirányítási technikák működését az automatizált járművek megjelenése. E vizsgálatok eredményét képezik a 2. Tézis állításai.

A 4. fejezetben egy dinamikus árazási technikán alapuló valós idejű megoldást javasol az úthálózat forgalmának szabályozására. Ez alkotja a 3. Tézis magvát.

Az 5. fejezetben elhelyezett 4. Tézisben a jelölt egy valós idejű kalibrációs módszert javasol a mikroszkópikus forgalomszimulációhoz, amely a valódi világ dinamikájának „digitalizált ikrét” hozza létre és alkalmazza egy új forgalomirányítási rendszerben. Végül a 6. fejezetben összefoglalja az eredményeket.

Az értekezés nyelvezete is precíz, jól használható a mű olvasásában a rövidítések jegyzéke. A szerző eltért attól a gyakorlattól, hogy egy rövidítés tartalmát annak első előfordulásánál minden egyes esetben részletesen elmagyarázza (elvégre az olvasó azonnal hagyatkozhat a rövidítések jegyzékére), s ezzel jelentős mennyiségű terjedelmet sikerült megszórolnia, mivel a jegyzék igen hosszú.

Az értekezésben kiválóan megszerkesztett függelékek vannak, amelyekben bizonyos részletek kiterjedten tárgyalhatók.

4. Kérdések

A „4.1.1 Control Design Based on the Concept of Traveler’s Utility Function” c. részben a (4.1) egyenletben C változóval jelölt „toll price” jól értelmezhetően a teljes út árára vonatkozik. Ennek általánosítása kíván lenni a (4.2) egyenletben a $C_i L_i$ kifejezés, ahol a C_i „unit toll price” mértékegysége már [€/km], így a nem definiált L_i mennyiség az i . út hossza kell legyen [km] egységben. Kérdésem, hogy ez elegendően részletes általánosítás? Nem fordulhat elő, hogy az i . út teljes L_i hosszát különböző „unit toll price” értékű szakaszokból kényszerül összeállítani a rendszer?

A 83. oldal (5.2) egyenletében a Jelölt „szakácskönyvbeli recepthez” hasonló módon idéz egy bizonyos GEH indexet, amelyre nézve a rövidítések jegyzékéből csupán annyi derül ki, hogy az „*GEH GEH formula gets its name from Geoffrey E. Havers*”, és arra utal, hogy a hagyományos elemzésekben ennek különböző tipikus értékei jellemeznék a modell és a megfigyelt valóság egymástól való eltérésére valamilyen kategóriákat.

Lehetne-e valami bepillantást adni arra, hogy e képlet mögött milyen fizikai kép húzódik meg?

Az értekezésben szó van arról, hogy a CO_2 emisszió növekedése egyik következménye lehet az automatizált járművek megjelenésének, mivel a fundamentális digaram úgy alakul át, hogy a szokásoshoz képest nagyobb sebességű forgalom is még stabil tud maradni. Emiatt –szerencsétlen módon– e tény úgy jelenik meg, mintha az ez automatizáltság egyik hátránya lenne, noha csak arról van szó, hogy a turbulens közegellenállás a légkörben a sebesség négyzetével növekszik, tehát ha élni kívánunk a nagyobb sebességű közlekedés előnyeivel, ez egy elkerülhetetlen járulék, miközben az automatizálás jóvoltából az *elkerülhető kibocsátás* voltaképp jelentős mértékben csökken a leállások, újraindítások, durva fékezések és gyorsítások kiküszöbölésével. Lehetne-e valami olyan mérőszámot kidolgozni az emisszióra, amely az elkerülhető járulék sikeres elkerülését méri?

5. A tézisek értékelése, nyilatkozat a tézisek elfogadásáról

Előrebocsátom, hogy a Jelölt valamennyi tézisét elfogadom új tudományos eredménynek. A tézisek publikációs alátámasztottságát is nagyon erősnek tartom. Meg kell jegyeznem, hogy ezek az eredmények olyan széles körben kutatott, és olyan összetettségű matematikai problémák megoldása kapcsán keletkeztek, hogy lényegük és újdonságtartalmuk többnyire olyan apró matematikai részletekhez kötődik, amelyeket általánosságban igen nehéz megfogalmazni. Ebből adódik, hogy maguknak a téziseknek a megfogalmazása az értekezésben is *szükségképpen bonyolult és terjedelmes. Ez a bonyolultság és terjedelmesség nem a Jelölt foglalmazási és összpontosítási képességének hiányából, hanem magának a szakterületnek a bonyolultságából és erősen előrehaladott állapotából adódik, amely nem tartalmaz már olyan triviális újdonság-részeket, amelyre nagyon egyszerűen lehetne rámutatni.* Aggódva kísérelem meg az alábbiakban megfogalmazni az egyes tézisek lényegét, ahogyan azokat remélhetőleg sikerült megértenem.

1. Tézis: A Jelölt a gyakorlatban alkalmazható, különböző jellegű és megbízhatóságú technológiákon alapuló, ritkás és néhol hiányos, torzított mérési adatokat felhasználó modellezési és becslési módszereket dolgozott ki a városi közlekedés modellezésére. Bemutatta, hogy a forgalmi paraméterek becsléséhez az adatok fúziójára alkalmas eszköz a „kapcsoló Kalman szűrő”. A hányosságok és torzítások leírására egy olyan formalizmust állított elő, amelynek használatával azok szabályozási és becslési célokra is közvetlenül felhasználhatók. Továbbá, a rekurrens neurális hálózatok egy speciális változatának (Long Short Term Memory Neural Network) felhasználásával modell-független helyettesítési módszert dolgozott ki a hiányos mérési adatok kipótlására a becslési és szabályozási feladatok megoldásához. A hálózat paramétereit és jellemzőit kitejédt és gondos szimulációs vizsgálatokkal állította be.

A tézishez közvetlenül kötődik egy szabadalom, egy magyar és egy angol nyelvű könyv (társszerzőkkel), 17 (folyóirat és konferencia cikk), melyek közül egy D1, egy Q1, egy Q2 és két Q3 minősítésű folyóirat közlemény.

2. Tézis: A tézis felépítése előtt a Jelölt gondosan összefoglalja azokat az irodalomból ismerhető szimulációs eredményeket, amelyek szerint a forgalomban lévő automatizált járművek számarányának változása a fundamentális diagramban várhatóan változásokat fog okozni a városi és a közúti közlekedésre vonatkozóan. Saját eredményeit nagyszámú már ismert eredményre kell ráépítenie. **A Jelölt egy saját szimulációs technikát dolgozott ki annak megállapítására, hogy a mikroszkópikus jármű jellemzők miképpen befolyásolják a makroszkópikus forgalmi modell fundamentális diagramját, különös tekintettel a járműautomatizáltság mértékére. A praktikus kezelhetőség érdekében trianguláris fundamentális diagram modellt épített ki mind a közúti, mind pedig a városi forgalom modellezésére. A szimulációk eredményeként összefüggést talált a makroszkópikus fundamentális diagram és az automatizáltság mértéke között.**

A tézist jelentős publikációk támasztják alá: összesen 9 folyóirat vagy konferenciaközlemény, melyek között kettő Q1 és kettő Q2 minősítésű folyóirat közlemény van.

3. Tézis: A tézis egy izgalmas „kollektív” jelenséghez kapcsolódik. Ma már minden egyes közlekedési eszköz vezetője használ valamiféle útvonal optimalizáló szolgáltatást, amelynek segítségével az egyedi

résztevők a saját szempontjaik szerinti optimumot megvalósítani ígérő útvonalat választják. Az ehhez szükséges információt valamilyen infrastrukturális rendszerből merítik, amelyen keresztül bizonyos keretek között manipulálható/szabályozhatóvá válnak. A pillanatnyi forgalmi helyzetre vonatkozóan kiadott információ olyan tömeges viselkedést generálhat, amely gyorsan megváltoztathatja azt az állapotot, amelynek alapján az útvonal választása történt. A folyamat dinamikája rendkívül izgalmas, akárcsak a szabályozás arra épülő lehetősége. A dinamikus árképzés egy ilyen beavatkozási lehetőséget kínál. Mindenképp figyelembe veendő, hogy egy aktuális döntés egy olyan információon alapul, amely meghozatalának időpontjában már kissé elavult. Ennek kiküszöbölésére lehet az általában nemlineáris modell predikciós technikát alkalmazni. A probléma különösen fontos szabad pályás tömegközlekedési eszközök, pl. buszok útvonalválasztásának megoldásában a torlódások és a dugóba ragadt útvonalszakaszok lehetséges elkerülésében. Az közlekedési jelzőlámpák elosztott rendszerarchitektúrában való szabályozása is egy gyakorlatias opció, amelyben a meghibásodások okozhatnak kritikus szituációkat.

A tézis lényege, hogy a Jelölt kidolgozott egy olyan dinamikus árszabályozáson alapuló útvonalválasztási technikát, amely az egyes közlekedőket a saját "utility function"-jain keresztül motiválja és befolyásolja. Ehhez hasonlóan kidolgozott egy automatizált buszok számára a dinamikus árazásra reagáló útvonalválasztási technikát, ami a menetrend pontosabb, megbízhatóbb betartását teszi lehetővé. Kidolgozott továbbá egy központi vezérlő egység nélküli, elosztott szerkezetű, intelligens egységekből felépülő jelzőlámpás szabályozórendszer számára egy működési algoritmust, amelynek összeomlásmentes, redundáns működését formális módszerek felhasználásával (Petri net) demonstrálta. A módszer az installálási és karbantartási költségek csökkentése szempontjából is gyakorlatilag fontos lehet.

A tézist egy szabadalom, két könyvfejezet és 20 folyóirat vagy konferenciaközlemény támasztja alá, amelyek közül három D1-es, kettő Q1-es, három Q2-es és három Q3-as minősítésű lapban jelent meg.

4. Tézis: Az értekezés leginkább összetett tézise az „*Chapter 5 Simulation Based Testing for Automated Road Traffic*” c. fejezetben található. Célja és motivációja világos: minden drága és veszélyes, „élőben elvégzett” tesztelés helyett célszerű relatíve olcsó és veszélytelen szimulációkkal megvizsgálni, hogy milyen forgalom alakul ki, midőn speciális mikroszkópikus viselkedéssel (és ennek megfelelő modellparaméterekkel) rendelkező járműveket beillesztenek bizonyos forgalmi környezetbe, amely eközben valamilyen szabályozás alatt is áll. Ennek fizikai analógiája lenne a ritka anyag fokozatos sűrítésével kialakuló „kollektív viselkedési tulajdonságai megjelenésének leírása”, azonban a fizikával szemben itt nem állnak rendelkezésre olyan irtatlan nagy részecskeszámok, amelyek mellett kényelmes átlagolásokat lehetne elvégezni, továbbá az „egyének sorsa” sem hanyagolható el teljes mértékben: egyetlen jármű szenvedhet olyan sérülést, amely számottevő forgalmi dugulást okoz a teljes rendszerben (ami gyakorlatilag pl. csak egy néhány sávós útkereszteződés is lehet). **Ezért általános kérdés, hogy egy elvégzett szimuláció eredményének milyen mértékben lehet egyáltalán hitelt adni, midőn azt a tényleges valóság leírására, közelítésére kívánjuk felhasználni.** Az irodalomban eddig rendelkezésre álló módszerek kritikai vizsgálata, az azokban alkalmazott közelítések/elhanyagolások alapján javasol a Jelölt új megoldásokat a problémák különböző szintjén, javaslatok emiatt állnak össze konzisztens módon egyetlen tézissé.

A Jelölt módszereket fejlesztett ki az automatizált funkciókkal rendelkező jármű/forgalomirányítás mikroszkópikus szimulációt is tartalmazó fejlesztésének támogatásához úgy, hogy azok megfelelő interfészekkel rugalmasan és szinkronizált módon csatlakoztathatók több meglévő mikroszkópikus szimulátorhoz.

Minden egyes „új modell” hordoz magában matematikailag formális tulajdonságokat és konkrét modell-paramétereket, amelyek realizisztikus értékeit valahogy el kell találni, azaz a modell értékei valamiképp „kalibrálандók”. Erre a Jelölt által javasolt módszer a modell behelyezése egy méretekkel megfigyelt tulajdonságú „alapigazsággal” rendelkező környezetbe, és a paraméterek olyan hangolása (pl. genetikusan algoritmusokkal), amely a megfigyelhető forgalmi viselkedéssel

összemérhető eredményre vezet. A Jelölt által kifejlesztett, genetikus algoritmus alapú megoldás segítségével a modellt valós időben lehet finomhangolni valós időben kapott mérési eredményekhez.

A Jelölt kifejlesztett továbbá egy speciális, forgalmi jelzőlámpákat használó szabályozási környezetet, amely alkalmas arra, hogy a szimulációs teszteléseket „irányított forgalmi környezetben” lehessen vele elvégezni.

A tézist egy könyv, egy kézikönyv, és egy oktatási anyagnak tűnő jegyzet („Közúti forgalommodellezési gyakorlatok”), 23 folyóirat- vagy konferenciaközlemény támasztja alá, melyek között egy darab Q1-es, négy darab Q2-es, és 3 darab Q3-as minősítésű közlemény van.

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

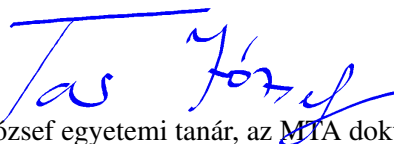
Az értekezés téziseinek nagyon erős publikációs alátámasztottsága, az értekezés gondos kivitele határozottan meggyőzőtt arról, hogy az értekezés hiteles adatokat tartalmaz.

7. Nyilatkozat a nyilvános vita megtartásáról

A fentiek alapján határozottan javaslom a nyilvános vita megtartását.

8. Javaslat az „MTA doktora” cím odaítéléséről

Értékelésem alapján határozottan javaslom a Jelölt számára az MTA doktora cím megadását.



Tar József egyetemi tanár, az MTA doktora