

*Magyar Tudományos Akadémia  
Műszaki Tudományok Osztálya*

**AZ AUTOMATIZÁLT KÖZÚTI KÖZLEKEDÉS  
MODELLEZÉSE, IRÁNYÍTÁSA ÉS SZIMULÁCIÓS TESZTELÉSE**

Dr. Tettamanti Tamás

*Tézisfüzet*

2022. január 13.

# Tartalomjegyzék

1. A téma újszerűsége, célkitűzések	2
2. Új tudományos eredmények	4
3. Az eredmények összefoglalása és hasznosítási lehetőségei	13
Hivatkozott saját publikációk	14
Hivatkozások	22

# 1. A téma újszerűsége, célkitűzések

A közúti járművek fejlődése az elmúlt évtizedekben rendkívüli módon felgyorsult a megnövekedett automatizációnak köszönhetően [78, 82]. Ennek a folyamatnak az egyik látványos eredménye például a járművekben található elektronikus vezérlőegységek gyorsan növekvő száma. Emellett a modern járművekben megjelennek olyan kommunikációs rendszerek is, amelyek képesek kapcsolatot teremteni más járművekkel („Vehicle to Vehicle”, jármű-jármű kommunikáció) vagy az infrastruktúrával („Vehicle to Infrastructure”, jármű-infrastruktúra kommunikáció) [85]. Az ilyen kommunikáción alapuló technológiák új lehetőséget nyitnak meg a járműirányításban: újszerű irányítások, vezetéstámogató rendszerek, jármű és infrastruktúra együttes kezelése. Ezen technológiák fejlesztése, tesztelése és szabványosítása már elkezdődött és a következő évtizedek fókuszában lesznek minden bizonnyal [79, 81]. Az automatizált járműtechnológia fejlődése pedig egyúttal az egész közlekedési rendszer automatizációját is előremozdítja, hiszen az infrastruktúra fejlődése elengedhetetlen a jövőbeli autonóm járművek számára [84].

Az ipar optimista becslése, de az ide vonatkozó Európai Unió irányelvek elvárása szerint is, 2030-ra a fejlett országokban a gépjárművek 5-10%-a autonóm működésű lesz vagy legalább bizonyos útszakaszokon önvezető üzemmódban is működtethető lesz [77]. A teljesen önműködő járműtechnológia betörése első körben a közforgalmú közlekedés, az áruszállítás és a taxi jellegű személyszállítás területén várható, hiszen ezek azok a szállítási módok, amelyek költséghatékony üzemeltetése kulcskérdés: az állami/önkormányzati fenntartású közforgalmú közlekedés finanszírozása állandó probléma, hiszen jellemzően nem profitképes; a szállítmányozás és a taxi szolgáltatás pedig a gazdasági versenyszféra területei, ahol emiatt fontos az automatizálásból származó költséghatékonyság elérése. A városokban 2030-ra még nem várható a teljesen szabadon mozgó autonóm járművek megjelenése a közlekedési szituációk komplexitása következtében (pl. gyalogosok, keresztezések, jelzőlámpák). Ugyanakkor kötött útvonalakon (pl. „autonóm sáv”-ban) és dedikált megállóhelyekkel már fognak tudni közlekedni: közforgalmú közlekedési járműként vagy akár járműmegosztó szolgáltatás ingajáratként. Ami a magántulajdonú önvezető személygépjárműveket, valamint a tehergépkocsikat illeti, azok elsődleges terepe 2030-ra a gyorsforgalmi úthálózat dedikált szegmensei lesznek, hiszen az autópályás robotpilóta már ma is elérhető technológia [89].

Az autonóm járműtechnológia prioritása mellett hangsúlyozandó, hogy a mai, folyamatban lévő közlekedési kutatások már általában az intelli-

gens közlekedési rendszerek és az ahhoz kapcsolódó intelligens infrastruktúra megvalósítására összpontosítanak, amelyek a részben vagy teljesen autonóm járművekkel együtt komplex közlekedési hálózatot alakítanak ki a jövőben [84].

A járművekre és a közlekedésre jellemző progresszív technikai fejlődésen túl az utóbbi időben az utazók által generált adatok is új, kulcsfontosságú tényezőként jelennek meg. Nevezetesen egyre több olyan információ áll rendelkezésre a közlekedésről, amelyeket jelenleg többnyire külön-külön vagy egyáltalán nem hasznosítanak. A jövőben a közlekedéssel kapcsolatos ún. „big data” (nagy adathalmaz) kiaknázásával hatalmas lehetőségek nyílnak meg a közlekedésirányítás terén is [83]. Példaként említhető az adatfúzió, amely a különböző „adatmorzsák” együttes alkalmazásával megbízhatóbb modellezést és előrejelzést tesz lehetővé [80, 87].

Ezek a kutatási irányok mind hozzájárulnak a közlekedési folyamatok szélesebb körű megértéséhez és jobb irányításához. Az új technológiák várható hatását azonban előzetesen gondosan fel kell mérni, széles körű és alapos teszteléssel együtt [86]. Ezt a munkát a különböző szimulációs eszközök fejlődése és azok autonóm járművek modellezéséhez való felhasználása biztosítja [88].

A fentiekben felvetett folyamatoknak, ill. problémáknak megfelelően az általam végzett tudományos munka célkitűzése az volt, hogy korszerű technológiákat dolgozzak ki a közúti forgalommodellezés, forgalomszabályozás, és a szimulációs tesztelés területén egy olyan változó környezetben, ahol az automatizálás mind jobban a járművek és a közlekedési rendszer integráns részévé kezd válni. A kutatásaim során a konkrét elérendő célok az alábbiak voltak:

- az automatizált járművek hagyományos közlekedésre gyakorolt hatásainak vizsgálata;
- hatékony megoldások keresése a közúti közlekedésben meglévő modellezési és becslési problémákra;
- korszerű forgalomszabályozási sémák kidolgozása;
- az autonóm járművek fejlesztését segítő tesztelési lehetőségek kiterjesztése, amely a forgalomszimulációs eszközök tesztelési keretrendszerbe történő integrálását, valamint egy újszerű jelzőlámpa-irányító rendszer kidolgozását jelenti.

## 2. Új tudományos eredmények

### 1. tézis

---

*A közúti forgalom adatainak mérése többféle technológiával és különféle megbízhatósággal történik. A mért adatok gyakran hibával terheltek vagy az adott szenzor meghibásodása miatt hiányosak. E problémák megoldására, a gyakorlatban is közvetlenül használható, becslési és modellezési módszertanokat dolgoztam ki irányításelméleti megközelítéseket alkalmazva. Ennek során bizonyítottam a kapcsoló Kalman-szűrő alkalmazhatóságát különböző szenzoradatok hatékony fuzionálására forgalmi paraméterek becslése céljából. Formalizáltam a mérések hibájából vagy hiányából származó bizonytalanságot a városi forgalmi modellezésben, amely így közvetlenül alkalmazható forgalombecslő vagy forgalomirányító algoritmusokban. Összehasonlító elemzéssel igazoltam a mesterséges intelligencia alkalmazhatóságát a hiányos mérések pótlásának problémájára.*

---

#### 1.1. tézis

Bemutattam, hogy a közúti mérések inhomogenitási problémája (ami a mérő eszközök különböző megbízhatóságából és az eltérő mintavételi frekvenciából adódik) kezelhető kapcsoló Kalman-szűrő alkalmazásával. A megoldás lehetővé teszi a különböző szenzoradatok hatékony fúzióját úgy, hogy akár időben változó szenzorszám is alkalmazható a becsléshez. A modellezett kapcsoló rendszer véletlen bolyongási modellt használ:

$$x(k+1) = x(k) + v(k), \quad (1)$$

$$y_{\rho(k)}(k) = C_{\rho(k)}x(k) + z_{\rho(k)}(k), \quad (2)$$

$$\rho(k) \in S = \{1, 2, \dots\}, \quad (3)$$

ahol  $x(k)$  a becsülendő forgalomtechnikai változó,  $y_{\rho(k)}(k)$  a mérést jelöli,  $v(k)$  és  $z_{\rho(k)}(k)$  - nulla várható értékű, normál eloszlású - állapot- ill. mérési zaj,  $\rho(k)$  pedig a kapcsoló jel (amelynek csak a mérési egyenletre van hatása). Az  $S$  halmaz a lehetséges mérési kombinációkat tartalmazza a különböző szenzortípusoknak megfelelően.

## 1.2. tézis

Bemutattam a Mozgó Horizontú Becslő (MHE) alkalmazhatóságát körforgalmi járműáramlatok becslésére. Ezt olyan speciális esetre is demonstráltam, amikor hiányos mérésekkel rendelkezünk. Gyakran megtörténik, hogy detektorhiba miatt egyes forgalmi igények ideiglenesen nem megfigyelhetők. Gyakorlati megoldásként az alkalmazott becslő módszerben az egyvel korábbi becslés értékét ( $\hat{x}(k-1)$ ) használhatjuk - behelyettesítve azt az alábbi

$$y(k) = C(k)x(k) \quad (4)$$

mérési egyenletbe.

## 1.3. tézis

A korszerű szabályozási vagy becslési módszerek olyan forgalmi modellekkel operálnak, amelyek tartalmazzák a hálózat legfontosabb statikus jellemzőit (pl. topológia) és további dinamikus paramétereket (pl. jelzőlámpa program). Egy megfelelően kiválasztott és felparaméterezett modellel a jövőbeli forgalmi állapotok becslhetők. Az alkalmazott forgalmi modellt azonban torzíthatják a zajos és/vagy hiányos szenzoradatok. Ehhez a problémakörhöz kapcsolódóan vezettem be a bizonytalanság modellezését kifejezetten a városi közúti forgalomra vonatkozóan. A forgalmi modell  $A$ ,  $B$ ,  $E$  rendszer-mátrixokkal és  $u(k)$  szabályozó jellel felírt állapotegyenletét multiplikatív bizonytalansági tagokkal egészítettem ki:

$$x(k+1) = (A + G\Delta(k)D_x)x(k) + Bu(k) + (I + G\Delta(k)D_d)Ed(k), \|\Delta(k)\|_2 \leq 1, \quad (5)$$

ahol

$$\|\Delta(k)\|_2 \leq 1 \quad (6)$$

az  $x(k)$  állapotra és a nem irányítható  $d(k)$  forgalmi igényre vonatkozó korlátos bizonytalanságot jelöli;  $D_x$ ,  $D_d$  és  $G$  súlymátrixok. A bevezetett bizonytalansági megközelítést alapul véve robusztus irányítási és becslési megoldásokat lehet alkalmazni.

## 1.4. tézis

Demonstráltam a mesterséges intelligencia alkalmazhatóságát hiányos forgalmi mérések esetére. A kutatás fő eredménye a járműérzékelők térbeli

kiterjesztésének módszere a közúti forgalomfigyelésben. Ez egyrészt egy olyan algoritmus kifejlesztését jelentette, amely kiválasztja az útszakaszok azon kisebb halmazát az adott városi hálózat teljes halmazából, amely a legjobb becslési teljesítményt képes nyújtani ( $R^2$  alapján) a teljes hálózatra nézve. Másrészt szimulációs vizsgálattal igazoltam, hogy - a forgalombecslésben eddig nem alkalmazott - hosszú-rövid távú memóriával rendelkező neurális háló (LSTM) jobb eredményeket ad e területen az irodalomban eddig használt más hálókkal szemben.

**A tézishez kapcsolódó konferencia- és újságcikkeim:**

[4, 10, 11, 13, 14, 19, 34, 35, 41, 44, 45, 46, 50, 51, 52, 70, 71]

**A tézishez kapcsolódó könyveim:**

[53, 66]

**A tézishez kapcsolódó szabadalmam:**

[31]

## 2. tézis

---

*Mikroszkopikus forgalomszimulációval analizáltam az autonóm járművek közúti járműforgalomra gyakorolt hatását a makroszkopikus fundamentális elméleten keresztül. Az autonóm közúti járművek forgalomban való megjelenésével a klasszikus fundamentális diagram megváltozik. Ehhez kapcsolódóan módszertant állítottam fel a városi és a gyorsforgalmi utak fundamentális diagramjának meghatározására az autonóm járművek figyelembevételével. A vizsgálat további eredményeképpen megállapítottam az autonóm járművek penetrációja és a makroszkopikus fundamentális diagram változása közötti összefüggéseket városi és a gyorsforgalmi úthálózatra egyaránt.*

---

### 2.1. tézis

Megmutattam, hogy az automatizált járművek jelentős potenciállal rendelkeznek a meglévő városi közlekedési rendszerek forgalmi kapacitásának, hatékonyságának, ill. stabilitásának javításában. Részletes érzékenységvizsgálatot végeztem, hogy megállapítsam a különböző mértékű penetráció hatásait - USA-ban jellemző - rács típusú hálózaton, valamint - organikusan kialakult, európai jellegű - városi közlekedési hálózaton. A makroszkopikus átlagsebességre vonatkozóan új megközelítést javasoltam a penetrációs ráta figyelembevételével:

$$V(r, \rho) = \alpha + s(\rho) + \beta \cdot r + \gamma \cdot r \cdot \rho, \quad (7)$$

ahol  $s(\rho)$  egy szakaszosan polinomokkal leírt görbe ( $\rho$  forgalomsűrűségtől függően), amelyet  $\alpha$ ,  $\beta$  és  $\gamma$  modellparaméterekkel együtt kell megbecsülni. Az automatizált járművek aránya ( $r$ ) kétszer szerepel a regressziós egyenletben. Egyrészt befolyásolja a szabadáramlási sebességet, ha a  $\beta$  becslése statisztikailag szignifikánsan eltér nullától. Másrészt az  $r$  és a  $\rho$  közötti összefüggésen keresztül hatással van a sebesség-sűrűség függvény meredekségére. A sebesség - automatizált járművek aránya - forgalomsűrűség összefüggés illesztésére általánosított additív modellen (GAM) alapuló regressziós módszert alkalmaztam.



## 2.2. tézis

A (7) egyenlet becslésekor kapott  $R^2$  és  $p$ -értékek azt mutatták, hogy a GAM modellen alapuló regressziós módszer megbízhatóan alkalmazható a sebesség - automatizált járművek aránya - forgalomsűrűség összefüggés meghatározására. Ez egyben a városi makroszkopikus fundamentális diagram (MFD) becslését is jelenti a folyadékdinamikából adaptált

$$Q(\rho) = \rho \cdot V(\rho) \quad (8)$$

alapegyenleten keresztül, ahol  $Q$  a forgalomnagyság,  $\rho$  a forgalomsűrűség, és  $V$  a térbeli átlagsebesség. A városi MFD görbék illesztésének eredményei azt mutatták, hogy a kapacitás közel lineárisan növekszik a penetrációval együtt mind a mesterségesen generált, mind a valós városi közúthálózatok esetében. Ez a javulás lényegében az automatizált járművek kisebb követési távolságának és rövidebb reakcióidejének köszönhető. A kutatás egy másik fontos eredménye, hogy amikor az önvezető autók kezdenek dominánsá válni az utakon, a maximális forgalomáramlás körül egyfajta plató alakul ki az MFD görbén. Ez a jelenség azt jelenti, hogy a maximális áteresztőképesség (ellentétben a hagyományos MFD görbék alakjával) nem egy egyértelmű maximum ponton érhető el, hanem egy hosszabb területen elnyúlva tetőzik.

## 2.3. tézis

Megvizsgáltam az autonóm járművek háromszög alakú forgalomnagyság ( $Q$ ) - forgalomsűrűség ( $\rho$ ) összefüggésére kifejtett hatását gyorsforgalmi környezetben:

$$Q = \min \{v \cdot \rho; w \cdot (\rho_j - \rho)\}, \text{ for } 0 \leq \rho \leq \rho_j, \quad (9)$$

ahol  $v$  a szabadáramlási sebesség,  $w$  a visszafelé ható hullámsebesség, és  $\rho_j$  a maximális forgalomsűrűség. Kimutattam, hogy az autópálya MFD paraméterei a követési idő, az autonóm járművek penetrációja és a sebességkorlátozás módosulásával együtt változnak. Azt is megállapítottam, hogy a követési idő csökkenése egy adott tartományban alacsonyabb fogyasztást és károsanyag-kibocsátást eredményez. Ugyanakkor ezen a tartományon kívül már az energiafogyasztás és a kibocsátás meredeken megnő. Azaz az optimális követési időt az üzemanyag-fogyasztás és a környezetvédelem szempontjából érdemes meghatározni.

**A tézishez kapcsolódó konferencia- és újságcikkeim:**

[16, 21, 23, 24, 27, 30, 64, 65, 68]

### 3. tézis

---

*Dinamikus útdíj alapú szabályozási technikát dolgoztam ki az alternatív útvonalak forgalomirányítási feladatára, amely nemlineáris modell prediktív szabályozást alkalmaz az egyéni utazók hasznossági függvényén keresztül. Módszertant állítottam fel automatizált közforgalmú buszok dinamikus, forgalomfüggő útvonaltervezésére, amely segítségével megbízhatóbbá tehető a menetrendtartás. Kidolgoztam a vezeték nélküli és elosztott működésű közúti forgalomirányító berendezés működési algoritmusát, amely központi vezérlőegység nélkül képes az egyes jelzőfejekhez tartozó intelligens egységek összehangolt irányítására. A gyakorlati, üzembiztos működést formális módszerrel igazoltam.*

---

#### 3.1. tézis

Az alternatív útvonalak problémájára dinamikus árképzésen alapuló forgalomszabályozási módszert dolgoztam ki. A hasznossági függvényen alapú forgalomirányítás képes a közúti infrastruktúra hatékony, torlódásmentes kihasználását biztosítani. Ezen túlmenően megvizsgáltam a reakciók időbeli késleltetési hatását is. A szimulációs eredmények azt mutatták, hogy a késleltetés oszcillációt okoz a választható útvonal-alternatívákon. Az alkalmazott nemlineáris modell prediktív szabályozási módszer azonban képes kezelni a késleltetési hatást, és így hatékony szabályozótípusként használható az alábbi  $\mu_i$  hasznossági függvényel:

$$\mu_i(k) = -\alpha T_i(k-h) - \beta c_i(k) L_i, \quad (10)$$

ahol  $L_i$  az  $i$ -edik útalternatíva hossza,  $T_i(k-h)$  az  $i$ -edik útalternatíva utazási ideje,  $h$  az autóvezető érzékelése miatti késési tag, és  $c_i$  az útdíj.

#### 3.2. tézis

Dinamikus, forgalomfüggő útvonalválasztási módszert dolgoztam ki az automatizált közforgalmú buszok számára, amely lehetővé teszi számukra, hogy a megállók között nem előre meghatározott útvonalakon közlekedjenek - ezzel minimalizálva az útvonal általános költségeit. A fix pontok közötti útvonalakat egy folyamatosan frissülő, súlyozott irányított gráfként modelleztem. A súlyok a kapcsolatok releváns paramétereit jelentik, amelyeket a

hálózatot monitorozó érzékelőkből lehet biztosítani. Az útvonal optimalizálása a  $k$ -legrövidebb útkeresési eljárással történik a menetrend betartása érdekében: ha a jármű időben eléri a következő megállót, akkor a legalacsonyabb általánosított költséggel rendelkező alternatívát választja, ellenkező esetben a leggyorsabb útvonalat követi.

### **3.3. tézis**

A irányítási algoritmusok elméleti kidolgozása mellett egy gyakorlati alkalmazás technológiai hátterét is kidolgoztam. Kialakítottam a vezeték nélküli, elosztott forgalomirányító berendezés koncepcióját, amely lehetővé teszi a jelzőlámpák központi irányítóegység nélküli irányítását. A koncepció elosztott irányítási módszert valósít meg. A megoldással csökkenthetők a jelzőlámpás csomópontok telepítési és karbantartási költségei, különösen akkor, ha az elektromos energiaellátást napelemek biztosítják. A gyakorlati alkalmazhatóságot formális módszerrel igazoltam: Petri-háló alapú modellezéssel bizonyítottam a rendszer - vonatkozó szabványoknak megfelelő - üzembiztos működését.

#### **A tézishoz kapcsolódó konferencia- és újságcikkeim:**

[3, 17, 20, 25, 26, 40, 42, 43, 47, 55, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 72, 73, 74, 76]

#### **A tézishoz kapcsolódó könyvem és könyvfejezetem:**

[28, 67]

#### **A tézishoz kapcsolódó használati mintaoltalmam:**

[18]

## 4. tézis

---

*Az automatizált funkciókkal összefüggő jármű-, ill. közlekedési fejlesztések tesztelésének támogatására mikroszkopikus forgalomszimulációt magába foglaló megoldást fejlesztettem ki, amelyben a forgalomszimuláció rugalmasan és szinkronizált módon kapcsolható össze más szimulátorokkal. Ehhez kapcsolódóan egy olyan, genetikus algoritmus alapú, kalibrációs módszert dolgoztam ki, amely segítségével valós idejű mérések esetén valós időben kalibrálható a forgalomszimuláció. Továbbá egy speciális jelzőlámpás forgalomirányító rendszert terveztem, amely kifejezetten az automatizált közlekedés tesztelési céljait szolgálja.*

---

### 4.1. tézis

Részletes érzékenységi vizsgálattal kimutattam, hogy a mikroszkopikus forgalomszimuláció általános gyakorlata alapos felülvizsgálatra és módosításra szorul, amikor automatizált járműveket is magába foglaló forgalom vizsgálatára alkalmazzuk. A mikroszkopikus szimulációnak az automatizált járművek viselkedésére való érzékenységének bemutatására validált szimulációs szoftvert (PTV VISSIM) alkalmaztam.

### 4.2. tézis

Kidolgoztam a mikroszkopikus forgalomszimuláció online kalibrációs technikáját. Olyan, gyakorlatban is alkalmazható, módszert mutattam be, amely segítségével a valós közúti forgalom „digitális ikerjét” lehet leképezni. Ezt az eredményt különösen az autonóm járművek tesztelési folyamataiban lehet hasznosítani. A genetikus algoritmuson alapuló kalibrációs folyamat költségfüggvényeként a relatív hiba  $L_\infty$ -normáját alkalmaztam annak érdekében, hogy az eltéréseket egyenletesen minimalizáljam:

$$\min_{Q(k)} \sum_{i=1}^n \left\| \frac{\bar{F}_i^{\text{Mért}}(k) - \bar{F}_i^{\text{Szimulált}}(Q(k))}{\bar{F}_i^{\text{Mért}}(k)} \right\|_\infty \quad (11)$$

ahol az  $\bar{F}_i^{\text{Mért}}(k)$  az átlagos forgalomnagyság az  $i$ -edik útszakaszon a valóságban mért értékek alapján,  $\bar{F}_i^{\text{Szimulált}}(Q(k))$  a forgalomszimuláció által generált átlagos forgalomnagyság az  $i$ -edik útszakaszon, ill.  $Q(k)$  a keresett paramétervektor (a hálózaton megjelenő igényforgalom).

### **4.3. tézis**

Egy olyan keretrendszert fejlesztettem ki, amelyben mikroszkopikus forgalomszimulációk (mint például a PTV VISSIM vagy a SUMO) együtt alkalmazhatók valós és/vagy virtuális objektumokkal. Ez a rendszer ezáltal egy ún. kevert valóságú tesztelési környezetet eredményez. Ebben lehetőség nyílik az automatizált járművek rugalmas, „jármű a hurokban” (Vehicle-in-the-Loop) tesztelésére úgy, hogy a tesztjárművet körülvevő forgalom szinkronizált módon, validált forgalomszimuláció alapján, virtuálisan jön létre.

### **4.4. tézis**

Egy speciális forgalomirányító rendszert terveztem autóiipari tesztpálya számára, amelyben felhőalapú irányítás segítségével több szinten lehetséges a jelzőlámpák szabályozása. A tervezett rendszer teljesen rugalmas és testre szabható tesztelést tesz lehetővé automatizált járművekkel és intelligens infrastruktúrával.

#### **A tézishoz kapcsolódó konferencia- és újságcikkeim:**

[1, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 15, 22, 29, 32, 33, 36, 37, 38, 39, 48, 54, 56, 63, 69, 75]

#### **A tézishoz kapcsolódó könyveim és műszaki útmutatóm:**

[2, 49, 53]

### 3. Az eredmények összefoglalása és hasznosítási lehetőségei

Jóllehet még számos nyitott kérdés fennáll az autonóm közlekedés bevezetése előtt, a már most elérhető magasan automatizált járműrendszerek és a hamarosan megjelenő teljesen autonóm vezetés folyamatos átalakulást indukálnak a járműiparban és a közlekedési ágazatban egyaránt. A közlekedési rendszerek nagyfokú komplexitása miatt a hatékony forgalombecslés, forgalomirányítás és a forgalomszimulációs technikák kritikus fontosságúak e változás műszaki támogatásához. A disszertációban ismertetett kutatások mind ezt a folyamatot tudják segíteni elméleti módszertanokon és gyakorlati megoldásokon keresztül. Korszerű és egyben költséghatékony forgalombecslési módszereket fejlesztettem, amelyek közvetlenül alkalmazhatók a közúti közlekedési rendszerek üzemeltetésében. Az automatizált vezetésnek a hagyományos közlekedési rendszerre kifejtett hatását forgalomszimulációs technikával analizáltam, majd az eredmények tükrében bővítettem a makroszkopikus fundamentális összefüggést. Dinamikus szabályozási sémákat dolgoztam ki egyéni járművek és közforgalmú buszok számára. A járműipari és a közlekedési fejlesztések tesztelésének támogatására mikroszkopikus forgalomszimulációt magába foglaló keretrendszert fejlesztettem ki, valamint egy új megközelítésű jelzőlámpa-irányító rendszer koncepcióját is kidolgoztam.

Kutatásaim során mindig szem előtt tartottam, hogy az elmélet a gyakorlattal is találkozzon. Ennek megfelelően a disszertációban bemutatott megoldások mindegyike gyakorlati módszertanként vagy konkrét gyakorlati alkalmazásként is megállja a helyét. Az elért eredményeket algoritmusimplementációként is elkészítettem validált matematikai, ill. forgalomszimulációs szoftverek együttes használatával. Ezen algoritmusokat pedig valós életből származó példákon keresztül verifikáltam az alkalmazhatóság igazolásaként. A gyakorlati hasznosíthatóságot leginkább egy szabadalom, egy használati mintaoltalom, valamint a ZalaZONE Járműipari Tesztpálya innovációs tevékenységeihez közvetlenül kapcsolódó fejlesztéseim igazolják. Ez utóbbiakból kiemelendő egyrészt az a szimulációs keretrendszer, amely lehetővé teszi a mikroszkopikus forgalomszimuláció valós idejű alkalmazását járműipari tesztekhez, másrészt az a fejlesztési munka, amely egy rugalmas jelzőlámpa-irányító rendszer kialakítását alapozza meg a ZalaZONE tesztpályán.

## Hivatkozott saját publikációk

- [1] C. Bartolini, T. Tettamanti, and I. Varga. Critical features of autonomous road transport from the perspective of technological regulation and law. *Transportation Research Procedia*, 27:791 – 798, 2017. 20th EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2017, 4-6. September 2017, Budapest, Hungary.
- [2] Zs. Bede, A. Csikós, M.T. Horváth, T. Tettamanti, and I. Varga. *Közúti forgalommodellezési gyakorlatok, 4. kiadás 3. és 4. fejezetek a Vissim 9 és 10-es verzió-hoz aktualizálva*. BME Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék, 2020. TAMOP-4.1.1.C-12/1/KONV-2012-0002.
- [3] A. Csikós, T. Tettamanti, and I. Varga. Nonlinear gating control for urban road traffic network using the network fundamental diagram. *Journal of Advanced Transportation*, 49(5):597–615, 2015.
- [4] A. Csikós, Zs. J. Viharos, K.B. Kis, T. Tettamanti, and I. Varga. Traffic speed prediction method for urban networks - an ANN approach. In *2015 International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, pages 102–108, June 2015.
- [5] S. Duleba, T. Tettamanti, Á. Nyerges, and Z. Szalay. Ranking the key areas for autonomous proving ground development using pareto analytic hierarchy process. *IEEE Access*, 9:51214–51230, 2021.
- [6] X. Fang and T. Tettamanti. Change in microscopic traffic simulation practice with respect to the emerging automated driving technology. *Periodica Polytechnica ser. Civil Engineering*, 2021.
- [7] X. Fang and T. Tettamanti. Traffic congestion phenomena when motorway meets urban road network. In *2021 IEEE 25th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, pages 000025–000030, 2021.
- [8] X. Fang, T. Tettamanti, and A.C. Piazzzi. Online calibration of microscopic road traffic simulator. In *2020 IEEE 18th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMi)*, pages 275–280, 2020.
- [9] K. Gangel, Z. Hamar, A. Hány, Á. Horváth, G. Jandó, B. Könyves, D. Panker, K. Pintér, M. Pataki, M. Szalai, Zs. Szalay, T. Tettamanti,

- V. Tihanyi, B. Tóth, B. Varga, and Zs.J. Viharos. Modelling the Zala-ZONE Proving Ground: a benchmark of State-of-the-art Automotive Simulators PreScan, IPG CarMaker, and VTD Vires. *Acta Technica Jaurinensis*, 14(4):488–507, Nov. 2021.
- [10] M. Gressai. and T. Tettamanti. Turning rate estimation in roundabouts: Analysis and validation of different estimation methods. In *Proceedings of the 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems - VEHITS*, pages 65–71. INSTICC, SciTePress, 2021.
- [11] M. Gressai, B. Varga, T. Tettamanti, and I. Varga. Investigating the impacts of urban speed limit reduction through microscopic traffic simulation. *Communications in Transportation Research*, 1:100018, 2021.
- [12] M.T. Horváth, Q. Lu, T. Tettamanti, Á. Török, and Zs. Szalay. Vehicle-In-The-Loop (VIL) and Scenario-In-The-Loop (SCIL) automotive simulation concepts from the perspectives of traffic simulation and traffic control. *Transport and Telecommunication Journal*, 2(20):153–161, 2019.
- [13] M.T. Horváth and T. Tettamanti. Real-time queue length estimation applying shockwave theory at urban signalized intersections. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(4):1153–1161, 2021.
- [14] M.T. Horváth and T. Tettamanti. Robust vehicle count estimation on urban signalized links. *Measurement*, 181:109581, 2021.
- [15] M.T. Horváth, T. Tettamanti, B. Varga, and Zs. Szalay. The Scenario-in-the-Loop (SciL) automotive simulation concept and its realisation principles for traffic control. In *hEART 2019 - 8th Symposium of the European Association for Research in Transportation*. European Association for Research in Transportation, 2019. Paper 62.
- [16] M.T. Horváth, T. Tettamanti, and I. Varga. Az autonóm járműforgalom modellezhetősége mikroszkopikus forgalomszimulációs szoftverben. *Közlekedéstud. Szemle*, LXVIII(2):34–44, 2018.
- [17] M.T. Horváth, T. Tettamanti, and I. Varga. (Smart CPS) Multiobjective dynamic routing with predefined stops for automated vehicles. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(4-5):396–405, 2019.



- [18] R. Hujber, T. Tettamanti, and I. Varga. Intelligent road traffic light system with distributed control, 2019. Registration number: 5034, NSZO: G08G 1/095 , Case Number: U1800160/10.
- [19] A. Kovács, Á. Leelőssy, T. Tettamanti, D. Esztergár-Kiss, R. Mészáros, and I. Lagzi. Coupling traffic originated urban air pollution estimation with an atmospheric chemistry model. *Urban Climate*, 37:100868, 2021.
- [20] B. Kővári, T. Tettamanti, and T. Bécsi. Deep reinforcement learning based approach for traffic signal control. *Transportation Research Procedia*, 2021. 24th EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2021, 8-10 September 2021, Aveiro, Portugal.
- [21] H. Lengyel, T. Tettamanti, and Zs. Szalay. Conflicts of automated driving with conventional traffic infrastructure. *IEEE Access*, 8:163280–163297, 2020.
- [22] H. Li, V.P. Makkapati, D. Nalic, A. Eichberger, X. Fang, and T. Tettamanti. A real-time co-simulation framework for virtual test and validation on a high dynamic vehicle test bed. In *2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV21)*. IEEE, 2021.
- [23] Q. Lu and T. Tettamanti. Impacts of autonomous vehicles on the urban fundamental diagram. In *5th International Conference on Road and Rail Infrastructure, CETRA 2018*,, pages 1265–1271, 17-19. May 2018.
- [24] Q. Lu and T. Tettamanti. Impacts of connected and automated vehicles on freeway with increased speed limit. *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*, 20(3), 2021.
- [25] Q. Lu and T. Tettamanti. Traffic control scheme for social optimum traffic assignment with dynamic route pricing for automated vehicles. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 49(3):301–307, 2021.
- [26] Q. Lu, T. Tettamanti, and D. Hörcher. Implications of user and system optimum based traffic control considering autonomous fleets. In *2019 IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, pages 1–5, 2019.

- [27] Q. Lu, T. Tettamanti, D. Hörcher, and I. Varga. The impact of autonomous vehicles on urban traffic network capacity: an experimental analysis by microscopic traffic simulation. *Transportation Letters*, 12(8):540–549, 2020.
- [28] T. Luspay, T. Tettamanti, and I. Varga. *Forgalomirányítás, Közúti járműforgalom modellezése és irányítása*. Typotex Kiadó, 2011. ISBN 978-963-279-665-9.
- [29] T. Tettamanti M. Szalai. Kevert valóság fejlesztési környezet autonóm járművek számára. *Közlekedéstud. Szemle*, LXXI(3):17–28, 2021. ISSN 0023-4362.
- [30] B. Maximcsuk, Q. Lu, and T. Tettamanti. Determining maximum achievable flows of autonomous vehicles based on macroscopic fundamental diagrams. *Perner’s Contacts, Special Issue: ”36th International Colloquium on Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry”*, pages 192–199, 2019.
- [31] Nokia Solutions and Networks OY, H. Demeter, N. Vékony, T. Tettamanti, I. Varga, and Á. Ludvig. Determining travel information (method and system for real-time travel time calculation in road traffic network using radio signaling data), 2014. Invention Publication No.: WO 2014/023339 A1.
- [32] T. Ormándi, B. Varga, and T. Tettamanti. Distributed intersection control based on cooperative awareness messages. In *5th Conference on Control and Fault Tolerant Systems (SysTol)*, pages 323–328, 2021.
- [33] T. Ormándi, B. Varga, and T. Tettamanti. Estimating vehicle suspension characteristics for digital twin creation with genetic algorithm. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 49(3):231–241, 2021.
- [34] A.C. Piazzzi and T. Tettamanti. Deep learning approach for spatial extension of traffic sensor points in urban road network. In *2019 IEEE 13th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, pages 81–86, 2019.
- [35] A.C. Piazzzi and T. Tettamanti. LSTM Approach for spatial extension of traffic sensor points in urban road network. In *hEART 2019 - 8th Symposium of the European Association for Research in Transportation*. European Association for Research in Transportation, 2019. Paper 81.

- [36] V. Potó, J.M. Lógó, T. Tettamanti, Á. Barsi, and N. Krausz. Térképi formátumok értékelése az önvezetés szempontjából. In *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában XI.: Theory meets practice in GIS*, pages 207–215, 2020.
- [37] M. Szalai, B. Varga, T. Tettamanti, and V. Tihanyi. Mixed reality test environment for autonomous cars using Unity 3D and SUMO. In *2020 IEEE 18th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII)*, pages 73–78, 2020.
- [38] Zs. Szalay, D. Esztergár-Kiss, T. Tettamanti, P. Gáspár, and I. Varga. Recar: Hungarian research center for autonomous road vehicles is on the way. *ERCIM News, In: Special Theme: Autonomous Vehicles*, 109:27–29, 2016.
- [39] Zs. Szalay, T. Tettamanti, D. Esztergár-Kiss, I. Varga, and C. Bartolini. Development of a test track for driverless cars: Vehicle design, track configuration, and liability considerations. *Periodica Polytechnica ser. Transportation Engineering*, 46(1):29–35, 2018.
- [40] G. Tamaskovics, T. Tettamanti, and I. Varga. Az intelligens jelzőfej koncepciója: vezeték nélküli, elosztott rendszerű jelzőlámpás forgalomirányítás. *Közlekedéstud. Szemle*, 6(LXVI):45–54, 2016.
- [41] T. Tettamanti. Innovatív közlekedési kutatás - korszerű mérési és irányítási módszerek városi közúti közlekedési hálózatban. *Közlekedéstud. Szemle*, LXIV(1):41–48, 2014.
- [42] T. Tettamanti. Wireless traffic signal controller with distributed control system architecture. *Periodica Polytechnica ser. Civil Engineering*, 63(3):918–925, 2019.
- [43] T. Tettamanti. Vezeték nélküli, napelemes jelzőlámpa. *Élet és Tudomány*, LXXV(39), 2020.
- [44] T. Tettamanti. Advanced methods for turning rate estimation in roundabouts. *Measurement*, 181:109676, 2021.
- [45] T. Tettamanti, T. Bécsi, and I. Varga. A közúti forgalom becslésére felhasználható mérési adatok és együttes alkalmazhatóságuk. *Közlekedéstud. Szemle*, LXIV(3):29–42, 2014.

- [46] T. Tettamanti, A. Csikós, K.B. Kis, Zs.J. Viharos, and I. Varga. Pattern recognition based speed forecasting methodology for urban traffic network. *Transport*, 33(4):959–970, 2018.
- [47] T. Tettamanti, A. Csikós, and I. Varga. Macroscopic modeling and control of emission in urban road traffic networks. *Transport*, 30(2):152, 161 2015.
- [48] T. Tettamanti, A. Csikós, I. Varga, and A. Eleőd. Iterative calibration of Vissim simulator based on genetic algorithm. *Acta Technica Jaurinensis*, 8(2):145–152, 2015.
- [49] T. Tettamanti and M.T. Horváth. *A practical manual for Vissim-COM programming in Matlab and Python – 5th edition for Vissim version 2020 and 2021*. Budapest University of Technology and Economics, Dept. for Control of Transportation and Vehicle Systems, 5th edition, 2021.
- [50] T. Tettamanti, M.T. Horváth, and I. Varga. Road traffic measurement and related data fusion methodology for traffic estimation. *Transport and Telecommunication*, 15(4):269–279, 2014.
- [51] T. Tettamanti, M.T. Horváth, and I. Varga. Közúti eljutási idő becslésének lehetősége adatfúziós technikával városi úthálózaton. *Közlekedéstud. Szemle*, LXVI(3):46–56, 2016.
- [52] T. Tettamanti, M.T. Horváth, and I. Varga. Nonlinear traffic modeling for urban road network and related robust state estimation. In *Proceedings of the 9th European Nonlinear Dynamics Conference*, page ID 247, 2017. ISBN 978-963-12-9168-1.
- [53] T. Tettamanti, T. Luspay, and I. Varga. *Road Traffic Modeling and Simulation*. Akadémiai Kiadó, 2019.
- [54] T. Tettamanti, Á.Z. Milacski, A. Lőrincz, and I. Varga. Iterative calibration method for microscopic road traffic simulators. *Periodica Polytechnica ser. Transp. Eng.*, 43(2):87–91, 2015.
- [55] T. Tettamanti, A. Mohammadi, H. Asadi, and I. Varga. A two-level urban traffic control for autonomous vehicles to improve network-wide performance. *Transportation Research Procedia*, 27:913 – 920, 2017. 20th EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2017, 4-6 September 2017, Budapest, Hungary.

- [56] T. Tettamanti, M. Szalai, S. Vass, and V. Tihanyi. Vehicle-In-the-Loop test environment for autonomous driving with microscopic traffic simulation. In *2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, pages 1–6, 2018.
- [57] T. Tettamanti, Á. Török, and I. Varga. Dynamic road pricing for optimal traffic flow management by using non-linear model predictive control. *IET Intelligent Transport Systems*, 13:1139–1147(8), 2019.
- [58] T. Tettamanti and I. Varga. Elosztott közúti forgalomirányító rendszer. *Városi Közlekedés*, XLIX(6):338–341, 2009.
- [59] T. Tettamanti and I. Varga. Traffic control designing using model predictive control in a high congestion traffic area. *Periodica Polytechnica ser. Transp. Eng.*, 37(1-2):3–8, 2009.
- [60] T. Tettamanti and I. Varga. Városi forgalomirányító rendszer prediktív szabályozással. *Városi Közlekedés*, XLIX(3):131–135, 2009.
- [61] T. Tettamanti and I. Varga. Distributed traffic control system based on model predictive control. *Periodica Polytechnica ser. Civil Eng.*, 54(1):3–9, 2010.
- [62] T. Tettamanti and I. Varga. Robusztus városi forgalomirányítás. *Városi Közlekedés*, LI(1-2):80–84, 2011.
- [63] T. Tettamanti and I. Varga. Development of road traffic control by using integrated VISSIM-MATLAB simulation environment. *Periodica Polytechnica ser. Civil Engineering*, 56(1):43–49, 2012.
- [64] T. Tettamanti and I. Varga. A jövő intelligens járművei és az infokommunikáció hatása. *Híradástechnika*, LXXI:59–63, 2016. „Smart City a célkeresztben” különszám.
- [65] T. Tettamanti and I. Varga. Az autonóm járművek forgalmi hatásai: a jármű- és forgalomirányítás kihívásai. *Közlekedéstud. Szemle*, LXIX(1):35–41, 2019.
- [66] T. Tettamanti, I. Varga, and A. Csikós. *Közúti mérések, Eszközök és módszerek a közúti járműforgalom megfigyelésére*. Typotex Kiadó, 2016. ISBN 978-963-279-916-2.

- [67] T. Tettamanti, I. Varga, and T. Péni. MPC in urban traffic management. In *Model predictive control*, pages 251–268. Open Access Books, IntechOpen, 2010.
- [68] T. Tettamanti, I. Varga, and Zs. Szalay. Impacts of autonomous cars from a traffic engineering perspective. *Periodica Polytechnica ser. Transp. Eng.*, 44(4):244–250, 2016.
- [69] V. Tihanyi, T. Tettamanti, M. Csonthó, A. Eichberger, D. Ficzer, K. Gangel, L.B. Hörmann, M.A. Klaffenböck, C. Knauder, P. Luley, Z.F. Magosi, G. Magyar, H. Németh, J. Reckenzaun, V. Remeli, A. Rövid, M. Ruether, S. Solmaz, Z. Somogyi, G. Soós, D. Szántay, T.A. Tomaschek, P. Varga, Zs. Vincze, C. Wellershaus, and Zs. Szalay. Motorway measurement campaign to support R&D activities in the field of automated driving technologies. *Sensors*, 21(6), 2021.
- [70] R.P. Tóth, M. Szalai, and T. Tettamanti. A HU-GO elektronikus útdíjrendszerből származó adatok forgalombecslési és forgalomirányítási célú felhasználási lehetőségei. *Közlekedéstudományi Szemle*, LXX(6):208–214, 2020.
- [71] B. Varga and T. Tettamanti. Városi járműforgalom térbeli becslése kernel módszerek segítségével. *Közlekedéstud. Szemle*, 5(LXXI):37–43, 2021.
- [72] B. Varga, T. Tettamanti, and B. Kulcsár. Optimally combined headway and timetable reliable public transport system. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 92:1 – 26, 2018.
- [73] B. Varga, T. Tettamanti, and B. Kulcsár. Energy-aware predictive control for electrified bus networks. *Applied Energy*, 252:113477, 2019.
- [74] B. Varga, T. Tettamanti, B. Kulcsár, and X. Qu. Public transport trajectory planning with probabilistic guarantees. *Transportation Research Part B: Methodological*, 139:81 – 101, 2020.
- [75] B. Varga, T. Tettamanti, and Zs. Szalay. System architecture for Scenario-In-The-Loop automotive testing. *Transport and Telecommunication Journal*, 22(2):141–151, 2021.
- [76] I. Varga, B. Kulcsár, T. Luspay, and T. Tettamanti. Korszerű szabályozások a közúti forgalomirányításban. *A Jövő Járműve*, 1-2:34–36, 2008.

## Hivatkozások

- [77] M. Alonso Raposo, M. Grosso, A. Mourtzouchou, J. Krause, A. Duboz, and B. Ciuffo. Economic implications of a connected and automated mobility in Europe. *Research in Transportation Economics*, 2021. paper nr. 101072.
- [78] J. Berrada and F. Leurent. Modeling transportation systems involving autonomous vehicles: A state of the art. *Transportation Research Procedia*, 27:215–221, 2017. 20th EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2017, 4-6 September 2017, Budapest, Hungary.
- [79] G. Dimitrakopoulos. *Vehicular Communications Standards*, pages 13–33. Springer International Publishing, Cham, 2017.
- [80] N.-E. El Faouzi, H. Leung, and A. Kurian. Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges - a survey. *Information Fusion*, 12(1):4–10, January 2011.
- [81] P. Gáspár, Zs. Szalay, and Sz. Aradi. *Highly automated vehicle systems*. BME MOGI, 2014. ISBN: 978-963-313-173-2.
- [82] P.A. Hancock, I. Nourbakhsh, and J. Stewart. On the future of transportation in an era of automated and autonomous vehicles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(16):7684–7691, 2019.
- [83] O. Iliashenko, V. Iliashenko, and E. Lukyanchenko. Big data in transport modelling and planning. *Transportation Research Procedia*, 54:900–908, 2021. International Scientific Siberian Transport Forum - TransSiberia 2020.
- [84] P.C. Jain. Trends in next generation intelligent transportation systems. In Marian Găiceanu, editor, *Self-Driving Vehicles and Enabling Technologies*, chapter 8. IntechOpen, Rijeka, 2021.
- [85] A.R. Khan, M.F. Jamlos, N. Osman, M.I. Ishak, F. Dzaharudin, Y.K. Yeow, and K.A. Khairi. DSRC Technology in Vehicle-to-Vehicle (V2V) and Vehicle-to-Infrastructure (V2I) IoT System for Intelligent Transportation System (ITS): A Review. In *Recent Trends in Mechatronics Towards Industry 4.0*, pages 97–106, Singapore, 2022. Springer Singapore.

- [86] M.V. Mamchenko, M.A. Romanova, and P.M. Trefilov. Defining the critical characteristics of unmanned vehicles in a smart city. *IFAC-PapersOnLine*, 54(13):488–492, 2021. 20th IFAC Conference on Technology, Culture, and International Stability TECIS 2021.
- [87] O. Qing. *Fusing Heterogeneous Traffic Data: Parsimonious Approaches using Data-Data Consistency*. PhD thesis, Delft University of Technology, 2011.
- [88] N. Raju and H. Farah. Evolution of traffic microsimulation and its use for modeling connected and automated vehicles. *Journal of Advanced Transportation*, 2021:2444363, 2021.
- [89] S. Razmi Rad, H. Farah, H. Taale, B. van Arem, and S.P. Hoogendoorn. Design and operation of dedicated lanes for connected and automated vehicles on motorways: A conceptual framework and research agenda. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 117:102664, 2020.