

# Korszerű mérési és irányítási módszerek városi közúti közlekedési hálózatban

*Tézisfüzet*

Tettamanti Tamás

Témavezető:  
Dr. Varga István



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

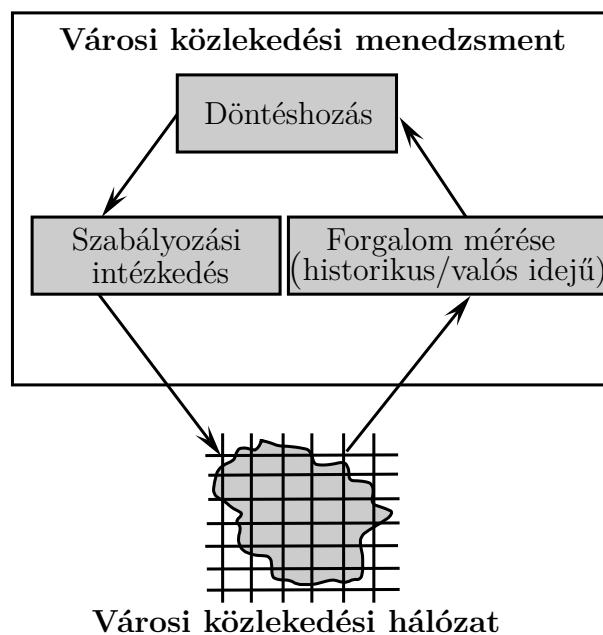
2013

# 1. Motiváció

A közúti motorizációs fok növekedése és az ezzel járó externális költségek megjelenése nagy kihívásokat jelentenek a tervező és üzemeltető közlekedési szakemberek számára. A közlekedési torlódás komoly negatív kihatás, amely mára gyakorlatilag mindennaposá vált a nagyvárosok útjain. A közlekedési hálózatok kapacitása csúcsidőben telítődik. Továbbá, a mai igények nem mindig szolgálhatók ki megfelelően még akkor sem, ha forgalomfüggő jelzőlámpás irányítás működik. Mindezek eredményeképpen az externális költségek jelentős többletteleherként jelennek meg a társadalom számára.

A fenntartható mobilitás és a megfelelő városi életminőség biztosítása érdekében komplex menedzsment stratégiára van szükség, amelynek fontos eleme a hálózati szintű, intelligens forgalomirányítás. A tervezés első lépéseként az elérendő célokat kell jól megfogalmazni. Majd az alkalmazható eszközöket (algoritmusok) és infrastrukturális elemeket kell megvizsgálni. A közlekedésirányítási stratégia gyakorlatilag megfelelő mérési, modellezési és szabályozási elemekből áll (lásd 1. ábra) [TV11a].

A disszertációmban ehhez a tématerülethez kapcsolódóan értem el eredményeket. A forgalom mérése és becslése, modellezése, valamint a városi közlekedés optimális és robusztus forgalomirányítása jelentik kutatásaim legfontosabb elemeit. Az eredmények összességében egy jobb kapacitáskihasználtságú közlekedés megvalósításához nyújtanak gyakorlati megoldásokat.



1. ábra. Városi közlekedési menedzsment rendszere

## 2. Célkitűzések és kutatási módszerek

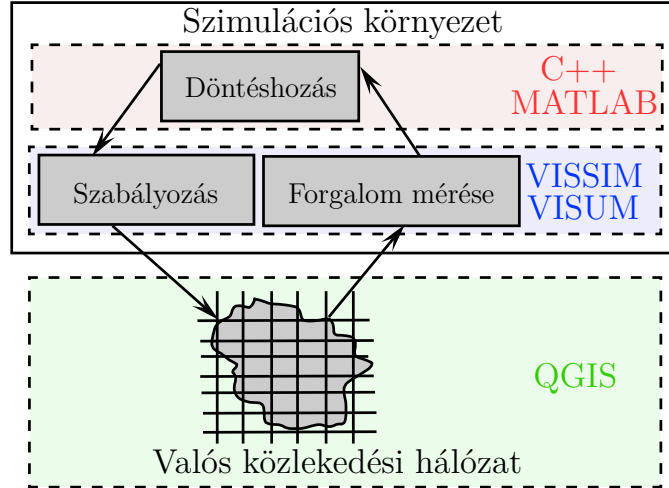
A disszertációban ismertetett kutatásaim alapvető célja az volt, hogy hozzájáruljak a városi közúti közlekedési folyamatok jobb megértéséhez és potenciális javításához korszerű technológiák alkalmazásával. Négy tématerületen vizsgálgódtam és értem el eredményeket. A kutatásaim alapvetően a közlekedés mérésének és irányításának területét érintette. A különböző részterületek közötti konzisztenciát pedig a problémák közötti összefüggések biztosítják. A kutatási célok az alábbi négy pontban foglalhatók össze.

1. Városi útszakaszokon alkalmazható, költséghatékony járműszám-becselő algoritmus fejlesztése.
2. Útválasztás, O-D mátrix, és forgalomnagyság becselő módszer megalakítása városi közúti hálózathoz mobiltelefon jelzési események felhasználásával.
3. Elosztott prediktív irányítási algoritmus fejlesztése városi közúti hálózat jelzőlámpás csomópontjainak zöldidő optimalizálására.
4. Sorhossz és igény bizonytalanságokat figyelembe vevő, robusztus irányítási algoritmus kutatása nagyméretű városi közúti hálózat jelzőlámpás csomópontjainak zöldidő optimalizálásához.

A disszertációban ismertetett tézisek gyakorlatilag a fenti célokhoz kapcsolódó kutatási eredmények megfogalmazásai.

A klasszikus visszacsatolt szabályozási séma (érzékelés, szabályozás, beavatkozás) a közlekedés irányításában is érvényes [TVB07, VKLT08, Tet08]. A szabályozáshoz felhasználható módszereket pedig a modern irányításelmélet tárházából kölcsönözhetjük. A disszertációban olyan hatékony irányítástechnikai eszközök kerülnek alkalmazásra mint az állapottér elmélet, Kalman-szűrő, prediktív és robusztus szabályozás [BG08]. Ezen kívül, a mobiltelefon jelzési események forgalom előrebecslésben való alkalmazhatóságát is vizsgálgótam, amely napjaink egyik legnépszerűbb kutatási területe [CWB08].

Kutatásaim során az elméleti módszerek mellett nagy hangsúlyt fektettem a kutatási eredmények validálására és reprezentálására. Ennek megfelelően egy olyan integrált szimulációs környezetet fejlesztettem (lásd 2. ábra) [TV12a, TLV08a, TLV08b], amely hatékonyan segíti a korszerű forgalomirányítási tervezés munkafolyamatát. Az alkalmazott szimulációs keretrendszer matematikai optimalizáló eszközökből (MATLAB, C++), forgalomszimulátorokból (VISSIM, VISUM), és GIS szoftverből (Quantum GIS) áll.



2. ábra. A teljes szimulációs keretrendszer

### 3. A tudományos eredmények összefoglalása

#### 1. tézis

*Olyan járműszám-becslő módszert dolgoztam ki, amely költséghatékonyan működtethető városi, jelzőlámpás közlekedési hálózatban. Az eljárás Kalman-szűrő becslési technikát és városi jármű-megmaradási modellt használ. A módszerek szakaszonként kettő vagy egy detektoros mérési konfigurációban alkalmazhatók. Az első konfiguráció telítetlen vagy telített forgalomban, míg a második telített forgalomban működtethető hatékonyan.*

[TV10b, TV10c, LTV11]

A valós idejű, Kalman-szűrő alapú sorhossz becslést [VPW08] ismertette. A technika három, útkeresztmetszetben mérő detektort használ (a szakasz elején, végén és közepén elhelyezve). A Kalman-szűrő állapot és mérési egyenlete a következő:

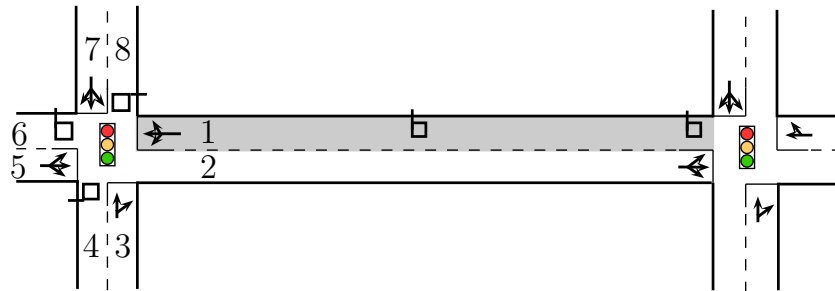
$$x(k+1) = x(k) + T(q_{in}^m(k) - q_{out}^m(k)) + Tv(k), \quad (1)$$

$$y(k) = x(k) + z(k) \frac{\Delta n}{L^{eff}} = \frac{\Delta n}{L^{eff}} o_T^m(k), \quad (2)$$

ahol  $x(k)$  a szakasz járműszáma,  $T$  a mintavételi idő,  $q_{in}(k)$  és  $q_{out}(k)$  a be- és kiáramló forgalom,  $v(k)$  és  $z(k)$  az állapot és mérési zaj,  $L^{eff}$  az átlagos effektív járműhossz,  $\Delta$  a szakasz hossza,  $n$  a sávszám, és  $o_T^m(k)$  az átlagos időbeli foglaltság. A módszer továbbfejlesztéseként a mérési konfigurációt

kétféleképpen is módosítottam, ami egyben az (1) állapotegyenlet módosítását is jelentette. A tézis kettő vagy egy detektoros mérési konfigurációval működő becslési eljárást ismertet.

Amennyiben a fordulási ráták ismertek (pl. megfelelő becsléssel előállíthatók [KVB04]), a kihaladó forgalom számítható a többi kapcsolódó szakasz bemeneti detektorainak méréseiből. Így a kimeneti detektorok eliminálha-



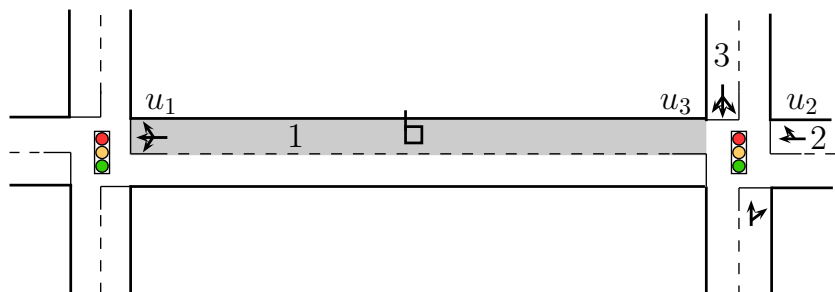
3. ábra. Két detektoros mérési konfiguráció

tók a rendszerből (lásd 3. ábra), valamint az (1) állapotegyenlet is módosul a következőképpen:

$$x_1(k+1) = x_1(k) + T(q_1^m(k) - \gamma_4 q_4^m(k) - \gamma_6 q_6^m(k) - \gamma_8 q_8^m(k)) + T v_1(k), \quad (3)$$

ahol  $\gamma(k)$  az 1-esről az adott szakaszra irányuló járműforgalom aránya a teljes belépő járműszámhoz viszonyítva.

A két detektoros mérési konfiguráció telítetlen vagy telített forgalomban is alkalmazható [GP63]. Továbbá az egy detektoros mérési konfiguráció is használható, amennyiben a mérőrendszert csak telített forgalomban alkalmazzuk. Az csomóponti átbecsátóképesség ( $S$ ), a zöldidő ( $u$ ), valamint a fordulási ráták ( $\beta$ ) ismeretében ugyanis a be- és kihaladó forgalom érzékelők nélkül is meghatározható. A mérési konfigurációt ebben az esetben a 4. ábra



4. ábra. Egy detektoros mérési konfiguráció

illusztrálja. A Kalman-szűrő (1) állapotegyenlete pedig a következő:

$$x_1(k+1) = x_1(k) + u_3(k)\beta_3 S_3 + u_2(k)\beta_2 S_2 - u_1(k)S_1 + T v_1(k). \quad (4)$$

A bemutatott két technika bármilyen keresztmetszeti érzékelővel használható (pl. hurok-, mágnes, vagy videódetektor). A eljárások fontos hozadéka a költséghatékonyság, hiszen alkalmazásukkal városi jelzőlámpás hálózatban elég szakaszonként csupán kettő vagy akár egy darab érzékelő megbízható járműszám becsléshez.

## 2. tézis

---

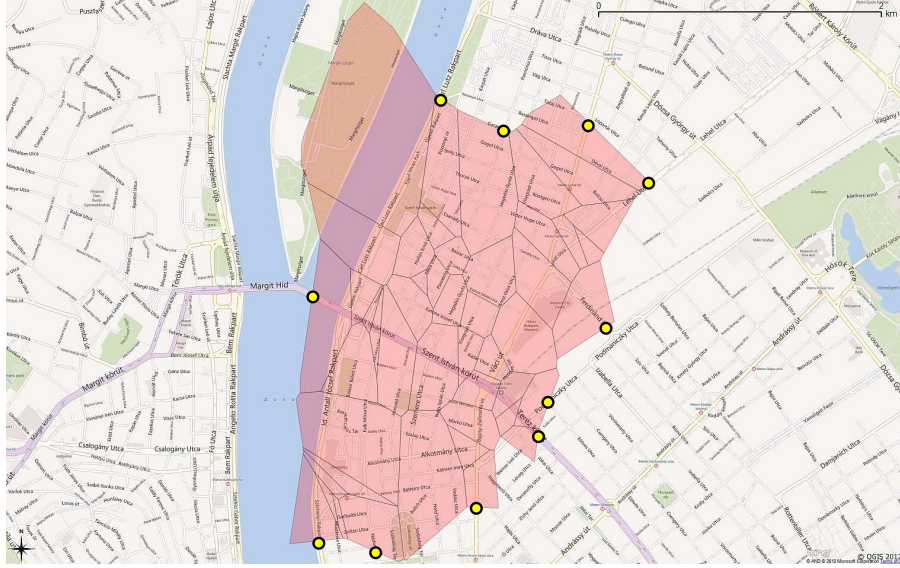
*Mobiltelefon jelzési eseményeken alapuló, makroszkopikus forgalombecslési módszertant dolgoztam ki városi, közúti közlekedési hálózathoz. A módszer alapja, hogy a városi közlekedési modell adaptálható a mobiltelefon-hálózat cella szintű modelljéhez. A mobiltelefon jelzési események mérésével és szűrésével előállítható az adott location area-hoz tartozó célforgalmi mátrix, amely alapján forgalmi ráterhelés végezhető. A ráterheléssel kapott forgalombecslés megbízhatósága tovább finomítható a cellaváltások alapján számolt átlagos utazási időekkel. Az eljárás során az utazási idők addicionális korlátozásként jelennek meg a ráterhelés optimalizálási feladatában.*  
[TDV12, TV12b, LTV12]

---

A mobiltelefonok jelzési eseményei értékes információként használhatók fel a közúti forgalom mérésére, előrebecslésre vagy akár irányítására. A telefonok automatikusan generálnak ún. handover (HO) és location area update (LAU) eseményeket, amelyeket hatékonyan tovább lehet hasznosítani. A HO/LAU események lehetséges alkalmazásainak köre rendkívül széles és napjaink egyik dinamikusan fejlődő kutatási iránya [CDLLR11, CWB08, VDRW09].

A klasszikus négylépéses közlekedési modellezésnek megfelelően először a közlekedési hálózat fő csomópontjait kell meghatározni, amelyek a forgalom kiinduló és célpontjaiként szolgálnak (célforgalmi csomópontok). A városi közlekedési modell adaptálható a mobiltelefon-hálózat cella szintű modelljéhez. A módszer lényege, hogy a célforgalmi csomópontokat az aktuális location area határoló celláiban definiáljuk (erre mutat példát az 5. ábra). Erre azért van szükség, mert HO eseményt csak hívás közben generál a telefon. Ugyanakkor, idle módban LAU jelzést mindig szolgáltat a készülék, amikor egy location area határon keresztül halad. Így a location area mint területi egység jól felhasználható célforgalmi becslésre.

Amennyiben megbízható utazási idők is rendelkezésre állnak a mobiltelefon cellaeseményekből, a klasszikus közlekedési ráterhelési probléma tovább



5. ábra. Location area Budapesten célforgalmi csomópontokkal

finomítható. A Voronoi-tesszellációval [CGW<sup>+</sup>08] leírt hálózat és az aggregált HO/LAU események alkalmazásával a mobiltelefonok utazási ideje meghatározható [LTV12]. Az érintett útszakaszok teljesítményfüggvénye pedig bekorlátozható a mért utazási idővel. Azaz a következő korlátozást kell a ráterhelési feladathoz hozzáadni:

$$t_a^m(1 - \Delta_a) \leq t_a \leq t_a^m(1 + \Delta_a), \quad (5)$$

ahol  $t_a^m$  az  $a$  élre vonatkozó, mért utazási idő, és  $\Delta_a$  egy bizonytalansági tényező. A forgalombecslési módszer az alábbi lépésekben foglalható össze:

1. HO/LAU események aggregálása az adott location area-n belül.
2. A jelzési események szűrése a pontosabb adatok kinyerése érdekében.
3. A célforgalmi mátrix meghatározása a jelzési események alapján.
4. Forgalmi ráterhelés elvégzése az adott location area-ra vonatkozóan.
5. A HO-szekvenciát generáló telefonok legvalószínűbb útvonalának meghatározása az előző lépésben elvégzett ráterhelés eredménye alapján.
6. A HO-szekvenciát generáló telefonok átlagos utazási idejének szakaszonkénti meghatározása ( $t_a^m$ ) a legvalószínűbb útvonalakon.
7. Közlekedési ráterhelési probléma megoldása - az utazási időkre vonatkozó - addicionális korlátozások (5) bevonásával.

### 3. tézis

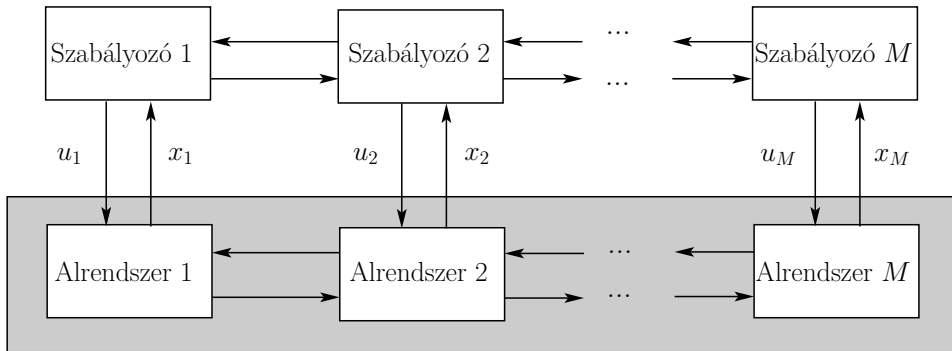
*Elosztott prediktív irányítási sémát dolgoztam ki városi hálózat jelzőlámpás forgalomszabályozására. Az alkalmazott irányítás gyakorlatilag egy forgalomfüggő jelzésterv optimalizálás, amely telített forgalomban alkalmazható. Az irányítási algoritmus a Lagrange-szorók módszerét és a projektált Jacobi-iterációt használja fel párhuzamos számítás megvalósítására. A technika segítségével a forgalomirányító berendezések között decentralizált irányítás valósítható meg.*

[TV09b, TV09a, TV10a, TVP10, LTV11]

A városi forgalom modell alapú prediktív irányításának (MPC) [Mac02] centrális megoldását publikálta [Var06], [TV09c] és [TV09d]. Az MPC irányító jeleit egy kvadratikus funkcionál véges predikciós horizont feletti minimalizálásával kapjuk:

$$\begin{aligned} \min_{u(k+i-1|k)} J(k), \\ u(k+i-1|k) \in \mathbb{U}, \\ x(k+i|k) \in \mathbb{X}, \end{aligned} \quad (6)$$

ahol  $\mathbb{X}$  és  $\mathbb{U}$  az állapot és szabályozó jelekre vonatkozó korlátozások politopikus halmazai. A módszer továbbfejlesztéseként decentralizált realizá-



6. ábra. Elosztott irányítási architektúra

ciót dolgoztam ki (lásd 6. ábra), amelyben a számítási műveleteket a csomóponti vezérlőgépek elosztott módon, globális kommunikációval valósítják meg.  $J(k)$  minimalizálása egy általánosított, kvadratikus optimalizálás:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}} J(k) = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \Phi \mathbf{u} + \beta^T \mathbf{u}, \\ \mathbf{F} \mathbf{u} - \mathbf{h} \leq 0. \end{aligned} \quad (7)$$



$\mathbf{u}$  a szabályozó jelek vektora.  $\Phi$  és  $\beta^T$  az állapotdinamikai modellt foglalják magukba.  $\mathbf{F}\mathbf{u} - \mathbf{h} \leq 0$  egyenlőtlenség a zöldidő-korlátozások betartásáért felel. A dualitás-elmélet [BT97] alapján (7) primál feladat duális alakra hozható, és az alábbi lineáris egyenletrendszer megoldására redukálható:

$$P\lambda = w, \quad \lambda_j \geq 0, \quad (8)$$

ahol  $P$  mátrix és  $w$  vektor  $\Phi$ ,  $\beta$ ,  $\mathbf{F}$ , és  $\mathbf{h}$  kombinációi. A projektált Jacobi-iteráció hatékonyan alkalmazható (8) megoldására [BT97]:

$$\lambda_j(t+1) = \max \left\{ 0, \lambda_j(t) - \frac{\kappa}{p_{jj}} \left( w_j + \sum_{k=1}^m p_{jk} \lambda_k(t) \right) \right\}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

ahol  $\kappa > 0$  egy hangoló paraméter és  $p$  pedig  $P$  mátrix eleme.

(8) duális feladat iterációs algoritmussal történő megoldásával az MPC elosztott módon implementálható párhuzamos számítással. Nagyméretű városi hálózatban az  $i = 1, 2, \dots, M$  számító egységek felfoghatók a csomópontokban található vezérlők processzoraiként. Az elosztott koncepció lényege, hogy (9) globális iterációs probléma  $M$  darab kisebb feladatra bontható. Az  $i$ -ik alprobléma gyakorlatilag az optimalizálási változók csökkentett halmazát figyelembe véve kerül kiszámításra. Az iteráció végső eredményéhez a részmegoldások növekvő pontosságú, közelítő megoldásaként jutunk.  $\lambda^*$  optimális megoldás kiszámítása után az MPC feladat végső eredménye (optimális zöldidők) már közvetlenül számítható.

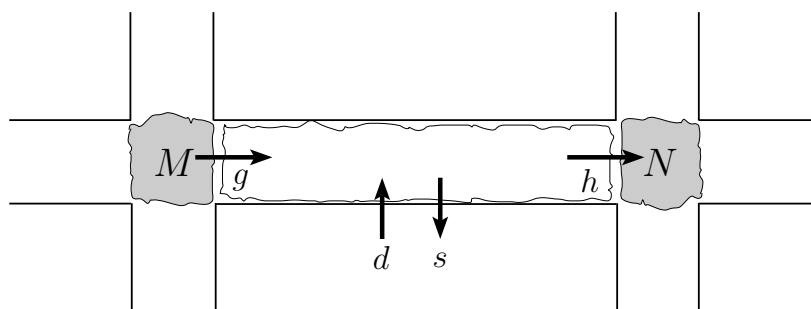
## 4. tézis

---

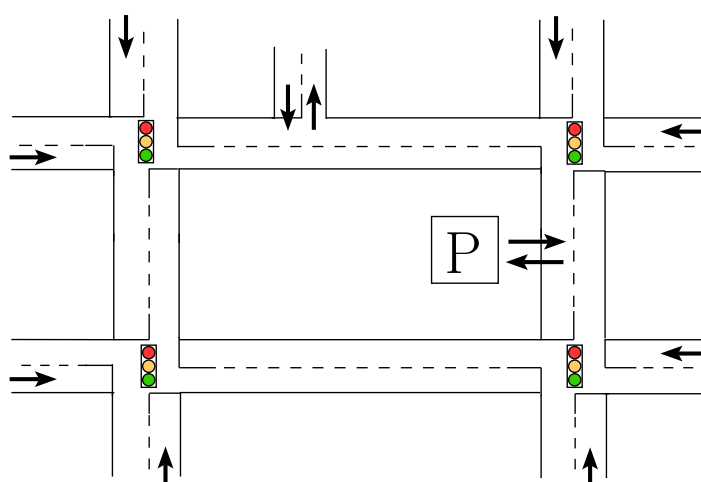
*Robusztus prediktív irányítási sémát dolgoztam ki városi hálózat forgalomfüggő jelzésterv optimalizálására. Az irányítási struktúra megalapozásaként felírtam a városi forgalom bizonytalansággal kibővített állapotter modelljét. A feladat hatékony és valós idejű megoldhatósága érdekében szemidefinit optimalizálást javasoltam. Az irányítási módszer segítségével lehetőség nyílik a forgalmi állapot- és igénybizonytalanságok kezelésére.*  
*[TVP<sup>+</sup>11, TV11b, LTV11]*

---

A korszerű forgalomirányítás jellemzően a rendszer megbízható modelljén alapul. A forgalommodellek pontosságát azonban nem mérhető zavarások csökkenthetik, amelyek gyakorlatilag modellbizonytalanságot hoznak



7. ábra. Forgalmi áramlatok városi útszakaszon



8. ábra. Potenciális bizonytalanságok városi közlekedési hálózatban

létre. A 7. ábra egy általánosított városi, jelzőlámpás útszakaszon megfigyelhető forgalmi áramlatokat illusztrálja.  $g$  és  $h$  jelzőlámpával irányított be- és kilépő járműforgalom (korszerű rendszerekben mérhető).  $d$  és  $s$  ugyanakkor olyan be- és kiáramló zavarás, amely gyakran nem mért vagy nem mérhető. A zavarások állapotbizonytalanságokat indukálnak. Továbbá az irányított hálózat peremén megjelenő - valós időben nem mért - forgalmi igény (szintén  $d$ -vel jelölhető) is képes igénybizonytalanságot generálni. A bizonytalanság számos okból kifolyólag megjelenhet a hálózatban (lásd a 8. ábrán nyilakkal jelölve), pl. mellékutca forgalma, parkolóház. Az állapot- és igénybizonytalanságok a hálózati teljesítőképesség csökkenéséhez vezethetnek egy jól megtervezett forgalomfüggő szabályozás dacára. Ezen kívül prediktív irányítás esetén [APKK10, dOC10], [TVKB08] azzal is számolni kell, hogy a bizonytalanságok hatása a teljes optimalizációs horizonton érvényesül.

A forgalomirányításhoz használt bizonytalan adatokból származó problémákat ismertette [Hey87]. [Rib94, Yin08, URP10, ZYL10] pedig már

konkrét robusztus jelzésterv számítási módszereket mutattak be. A disszertációban az előbbi publikációkban alkalmazottaktól eltérő modellezési és irányítási technikát alkalmaztam. Egyrészt a store-and-forward modellt kiegészítettem állapot- és igénybizonytalansággal, másrészt prediktív szabályozási sémát javasoltam [TVKB08]. A forgalomirányítási feladat gyakorlatilag egy minimax optimalizálás megoldását jelenti a következő formában:

$$\begin{aligned} \min_u \max_{\Delta} \quad & \sum_{i=0}^{K-1} x(k+i|k)^T Q x(k+i|k) + u(k+i|k)^T R u(k+i|k), \\ \text{subject to} \quad & u(k+i|k) \in \mathbb{U}, \quad \forall \Delta \in \Delta, \\ & x(k+i|k) \in \mathbb{X}, \quad \forall \Delta \in \Delta, \\ & \Delta(k+i|k) \in \Delta. \end{aligned} \tag{10}$$

$Q \succ 0$  és  $R \succ 0$  diagonális súlyozó mátrixok.  $\Delta$  a potenciális bizonytalanságok halmazát jelenti. A minimax feladat lényege, hogy a minimális költséget a bizonytalanságok lehetséges maximális hatása mellett keressük megfelelő  $u(k+i|k)$  zöldidő beállításokkal. (10) optimalizálás ugyanakkor nem determinisztikus időbonyolultságú probléma (NP-hard); a számítási idő exponenciálisan nő a hálózat méretével. Emiatt [GOL98, Lö03, BV04] eredményei alapján a minimax feladatot egy hatékonyan megoldható szemidefinit optimalizálássá relaxáltam.

## 4. Jövőbeli kutatási irányok

A tervezett jövőbeli kutatásaim főként a 2. és 4. tézis továbbfejlesztését jelentik.

A mobiltelefon jelzési eseményeken alapuló becslési módszertan potenciális bázisát jelentheti további korszerű ITS alkalmazásoknak. A módszer analógiája ezen kívül alkalmazható tetszőleges vezeték nélküli hálózatban, pl. WI-FI, RFID, Bluetooth. Továbbá a módszertan továbbfejleszthető a HO/LAU események adott pontokon történő mesterséges generálásával. Ezáltal még pontosabb forgalombecslést lehet megvalósítani.

A bemutatott robusztus zöldidő optimalizálás központi számítási eljárást alkalmaz. Ez különösen nagy hálózat (pl. teljes városrészek) esetén már gondot okozhat a valós idejű számítás biztosítása terén. A módszer ugyanakkor arra is használható, hogy a hálózat egyes részeit (pl. kisebb csomópontok) bizonytalanságként modellezzük ezzel csökkentve a méretet. Egy másik megoldás pedig a robusztus algoritmus elosztott számításra alapuló megvalósítása.

## Hivatkozások

- [APKK10] K. Aboudolas, M. Papageorgiou, A. Kouvelas, and E. Kosmatopoulos. A rolling-horizon quadratic-programming approach to the signal control problem in large-scale congested urban road networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(5):680–694, 2010. Applications of Advanced Technologies in Transportation: Selected papers from the 10th AATT Conference.
- [BG08] J. Bokor and P. Gáspár. *Irányítástechnika járműdinamikai alkalmazásokkal*. Typotex, 2008.
- [BT97] D.P. Bertsekas and J.N. Tsitsiklis. *Parallel and distributed computation: Numerical methods*. Prentice Hall, Old Tappan, NJ (USA), 1997. ISBN 1-886529-01-9.
- [BV04] S. Boyd and L. Vandenberghe. *Convex optimization*. Cambridge University Press, 2004. ISBN 0 521 83378 7.
- [CDLLR11] F. Calabrese, G. Di Lorenzo, L. Liu, and C. Ratti. Estimating origin-destination flows using mobile phone location data. *Pervasive Computing, IEEE*, 10(4):36–44, 2011.
- [CGW<sup>+</sup>08] J. Candia, M.C. González, P. Wang, T. Schoenharl, G. Madey, and A.-L. Barabási. Uncovering individual and collective human dynamics from mobile phone records. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 41(22):224015, 2008.
- [CWB08] N. Caceres, J.P. Wideberg, and F.G. Benitez. Review of traffic data estimations extracted from cellular networks. *IET Intelligent Transport Systems*, 2(3):179–192, 2008.
- [dOC10] L.B. de Oliveira and E. Camponogara. Multi-agent model predictive control of signaling split in urban traffic networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(1):120–139, 2010. Information/Communication Technologies and Travel Behaviour; Agents in Traffic and Transportation.
- [GOL98] L. E. Ghaoui, F. Oustry, and H. Lebret. Robust solutions to uncertain semidefinite programs. *SIAM Journal on Optimization*, 9(1):33–52, 1998.

- [GP63] D.C. Gazis and R.B. Potts. The oversaturated intersection. In *Proceedings of the Second International Symposium on Traffic Theory, London, UK*, pages 221–237, 1963.
- [Hey87] B. Heydecker. Uncertainty and variability in traffic signal calculations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 21(1):79–85, 1987.
- [KVB04] B. Kulcsár, I. Varga, and J. Bokor. Constrained split rate estimation by moving horizon. In *16th IFAC World Congress Prague*, volume 16, Czech Republic, 2004.
- [Lö03] J. Löfberg. *Minimax approaches to robust model predictive control*. PhD thesis, Linköping University, Linköping, Sweden, 2003.
- [Mac02] J.M. Maciejowski. *Predictive Control with Constraints*. Prentice Hall, Harlow, UK, 2002.
- [Rib94] P.C.M. Ribeiro. Handling traffic fluctuation with fixed-time plans calculated by TRANSYT. *Traffic Engineering and Control*, 35(6):362–366, 1994.
- [URP10] S.V. Ukkusuri, G. Ramadurai, and G. Patil. A robust transportation signal control problem accounting for traffic dynamics. *Comput. Oper. Res.*, 37:869–879, 2010.
- [Var06] I. Varga. *Közúti folyamatok paramétereinek modell alapú becslése és forgalomfüggő irányítása*. PhD thesis, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2006.
- [VDRW09] D. Valerio, A. D’Alconzo, F. Ricciato, and W. Wiedermann. Exploiting cellular networks for road traffic estimation: A survey and a research roadmap. In *IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, pages 1–5. Ieee, 2009.
- [VPW08] G. Vigos, M. Papageorgiou, and Y. Wang. Real-time estimation of vehicle-count within signalized links. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(1):18 – 35, 2008.
- [Yin08] Y. Yin. Robust optimal traffic signal timing. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42:911–924, 2008.

- [ZYL10] L. Zhang, Y. Yin, and Y. Lou. Robust signal timing for arterials under day-to-day demand variations. *Transportation Research Record*, 2192:156–166, 2010.

## Saját publikációk

- [LTV11] T. Luspay, T. Tettamanti, and I. Varga. *Forgalomirányítás, Közúti járműforgalom modellezése és irányítása*. Typotex Kiadó, 2011. ISBN 978-963-279-665-9.
- [LTV12] Á. Ludvig, T. Tettamanti, and I. Varga. Travel time estimation in urban road traffic networks based on radio signaling data. In *14th International Conference on Modern Information Technology in the Innovation Processes of Industrial Enterprises, MITIP*, pages 514–527, Budapest, 2012. ISBN 978-963-311-373-8.
- [TDV12] T. Tettamanti, H. Demeter, and I. Varga. Route choice estimation based on cellular signaling data. *Acta Polytechnica Hungarica*, 9(4):207–220, 2012.
- [Tet08] T. Tettamanti. Autópálya forgalmának szabályozása a felhajtó- és változtatható sebességkorlátozás összehangolásával. *Városi Közlekedés*, XLVIII(5):293–296, 2008.
- [TLV08a] T. Tettamanti, T. Luspay, and I. Varga. Forgalomirányító rendszerek zárt hurkú szimulációja. In *MMA Symposium, Innováció és Fenntartható Felszíni Közlekedés Konferencia*, pages 1–8, 2008. CD/IFFK2009Tettamanti-Varga.pdf.
- [TLV08b] T. Tettamanti, T. Luspay, and I. Varga. Összehangolt autópálya-forgalomirányító rendszer vizsgálata zárt hurkú mikroszimulációs környezetben. In *Acta Agraria Kaposváriensis*, volume 12, pages 1–10, 2008. ISSN: 1418-1789.
- [TV09a] T. Tettamanti and I. Varga. Elosztott közúti forgalomirányító rendszer. *Városi Közlekedés*, XLIX(6):338–341, 2009.
- [TV09b] T. Tettamanti and I. Varga. MPC alapú, elosztott városi forgalomirányító rendszer. In *MMA Symposium, Innováció és Fenntartható Felszíni Közlekedés Konferencia*, 2009. CD/IFFK2009Tettamanti-Varga.pdf.

- [TV09c] 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.
- [TV09d] T. Tettamanti and I. Varga. Városi forgalomirányító rendszer prediktív szabályozással. *Városi Közlekedés*, XLIX(3):131–135, 2009.
- [TV10a] T. Tettamanti and I. Varga. Distributed traffic control system based on model predictive control. *Periodica Polytechnica ser. Civil Eng.*, 54(1):3–9, 2010.
- [TV10b] T. Tettamanti and I. Varga. Forgalm nagyság mérése városok közúthálózatán. *Városi Közlekedés*, L(2):99–104, 2010.
- [TV10c] T. Tettamanti and I. Varga. Városi forgalom állapotter alapú modellezése és irányítási módszerei. In *MMA Symposium 2010, Innováció és Fenntartható Felszíni Közlekedés Konferencia*, 2010. ISBN 978-963-88875-0-4.
- [TV11a] T. Tettamanti and I. Varga. Control of road traffic systems - interaction of infrastructure, control system and vehicle. In *INNOMECH 2011, Advanced Control Systems in Vehicles*, pages 37–42, 2011. ISBN 978-963-7294-96-9.
- [TV11b] T. Tettamanti and I. Varga. Robusztus városi forgalomirányítás. *Városi Közlekedés*, LI(1-2):80–84, 2011.
- [TV12a] T. Tettamanti and I. Varga. Development of road traffic control by using integrated VISSIM-MATLAB simulation environment. *Periodica Polytechnica ser. Civil Eng.*, 56:43–49, 2012.
- [TV12b] T. Tettamanti and I. Varga. Urban road traffic estimation based on cellular signaling data. In *14th International Conference on Modern Information Technology in the Innovation Processes of Industrial Enterprises, MITIP*, pages 220–230, Budapest, 2012. ISBN 978-963-311-373-8.
- [TVB07] T. Tettamanti, I. Varga, and J. Bokor. Autópálya forgalomszabályozás felhajtókorlátozás és változtatható sebességkorlátozás összehangolásával és fejlesztési lehetőségei. In *MMA Symposium, Innováció és Fenntartható Felszíni Közlekedés Konferencia*, 2007.

- [TVKB08] T. Tettamanti, I. Varga, B. Kulcsár, and J. Bokor. Model predictive control in urban traffic network management. In *16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, pages 1538–1543, Ajaccio, Corsica, France, 2008. CD ISBN: 978-1-4244-2505-1.
- [TVP10] T. Tettamanti, I. Varga, and T. Péni. *Model Predictive Control*, chapter MPC in urban traffic management, pages 251–268. InTech, 2010. ISBN 978-953-307-102-2.
- [TVP<sup>+</sup>11] T. Tettamanti, I. Varga, T. Péni, T. Luszpay, and B. Kulcsár. Uncertainty modeling and robust control in urban traffic. In *18th IFAC World Congress*, pages 14910–14915, 2011.
- [VKLT08] I. Varga, B. Kulcsár, T. Luszpay, and T. Tettamanti. Korszerű szabályozások a közúti forgalomirányításban. *A Jövő Járműve*, 1-2:34–36, 2008.