



Összehangolt autópálya-forgalomirányító rendszer vizsgálata zárt hurkú mikroszimulációs környezetben

Tettamanti T., Luspay T., Varga I.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki Kar, Közlekedésautomatika Tanszék,
1111 Budapest, Bertalan Lajos utca 2.

ÖSSZEFOGLALÁS

A publikációban dinamikus autópálya-forgalomirányítási stratégia bemutatására kerül sor. A módszer alkalmazásával javítható a gyorsforgalmi utak kapacitáskihasználása, ill. lassítható vagy akár elkerülhetővé tehető a torlódások kialakulása. A rendszer összehangolva működtet két különböző, külföldön már gyakorlatban is alkalmazott szabályozási módszert: felhajtó-korlátozást és változtatható sebességkorlátozást. A felhajtás-korlátozó egy LQ szabályozó. A változtatható sebességkorlátozó pedig egy kapcsoló szabályozás. A rendszert zárt hurkú mikroszimulációs környezetben teszteltük. A szimulációs eredmények egyértelműen igazolják az összehangolt szabályozás hatékonyságát és bizonyítják alkalmazhatóságát.

(Kulcsszavak: autópálya forgalomirányító rendszer, LQ szabályozás, kapcsoló szabályozás, mikroszkopikus forgalomszimuláció)

ABSTRACT

Examination of coordinated freeway management system in closed loop microsimulation environment

T. Tettamanti, T. Luspay, I. Varga

Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Transportation Engineering
Department of Transportation Automation, H-1111 Budapest, Bertalan Lajos utca 2.

This paper investigates dynamic freeway traffic management strategy. Using this method the capacity of freeways can be ameliorated and the evolution of traffic congestions reduced or as well avoided. The system operates two different control methods in a coordinated way - ramp metering and variable speed control – which are already in use in many countries. The ramp metering is an LQ control design. The variable speed limit control is a switching control. The system was tested in a closed loop microsimulation environment. The simulation results clearly prove the effectiveness and the practical applicability of the coordinated strategy.

(Keywords: freeway traffic management system, coordinated control, LQ control, switching control, microscopic traffic simulation)

BEVEZETÉS

A motorizációs ráta folyamatos növekedése világszerte megfigyelhető jelenség. Az egyre gyakoribb közúti torlódások számos közvetlen és további externális hatások megjelenéséhez vezetnek. Az ebből kialakuló, áttételesen megjelenő költségek pedig a

társadalom egészét terhelik. A közúti közlekedés progresszív növekedési folyamatát természetesen nem lehet megakadályozni, így a probléma megoldására leginkább két lehetőség kínálkozik: újabb közúti pályák építése, illetve a forgalomszabályozás. Az infrastruktúrabővítés azonban rendkívül drága megoldás, ráadásul bizonyos helyeken hely hiányában meg sem valósítható. A forgalomszabályozás ezzel szemben viszonylag olcsó és hatékony módszer.

Számos stratégia és módszer került kidolgozásra az elmúlt évtizedben az autópálya forgalomszabályozás témakörében (*Bellemans et al., 2002; Chu and Yang, 2003; Papageorgiou et al., 2003*). Az eddig kidolgozott technikák általában egy-egy szabályozási módszeren alapulnak. A különböző algoritmusok összehangolt működtetésével azonban tovább fokozható az irányítás hatásfoka, ami a gyorsforgalmi utak esetében a kapacitáskihasználás megnövelését jelenti leginkább.

A szabályozás hatékonyságának vizsgálatához, és a felhasznált elmélet igazolásához a rendszer modellezésére és szimulációjára volt szükség. Ehhez egy zárt hurkú mikroszimulációs keretrendszert hoztunk létre. Így a forgalmi modell és a szabályozók is egy személyi számítógépen belül kerültek megvalósításra.

A szimulációs eredmények jól reprezentálják az összehangolt irányítási stratégia hatékonyságát.

ANYAG ÉS MÓDSZER

Felhasznált szabályozási módszerek (felhajtó-korlátozás, változtatható sebességkorlátozás)

A felhajtó-korlátozás lényegében az autópályára felhajtani szándékozó járművek szabályozását jelenti (*Kachroo and Krishen, 2000; Sun and Horowitz, 2005*). Az autópályán elérhető maximális forgalom nagyság biztosítása érdekében, a felhajtókon hagyományos, kétfogalmú jelző berendezéssel (*1. ábra*) szabályozható a beáramló járművek száma.

1. ábra

Felhajtó-korlátozás



Figure 1. Ramp metering

A módszer alkalmazásával ugyan megnőhet a várakozási idő, és sor is kialakulhat, ám a feltartott járművek a felhajtás után, illetve általában véve az autópálya hálózatot használók számos előnyhöz jutnak.

Az összehangolt rendszerben a felhajtás-korlátozó szabályozó egy LQ optimális irányítási probléma megoldását jelenti (Diakaki et al., 1999).

2. ábra

Az autópálya felhajtó diszkrét értékekkel

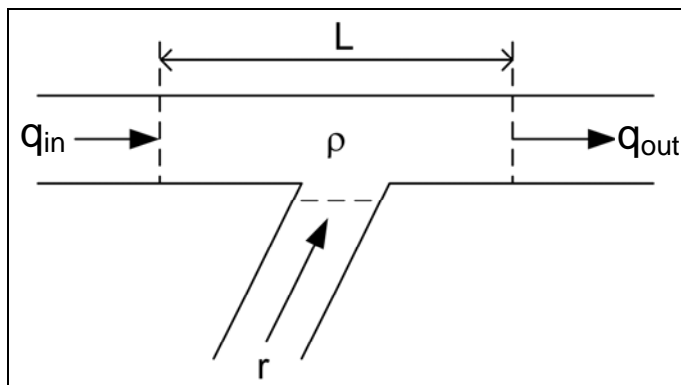


Figure 2. Ramp with discrete parameters

A 2. ábrán látható szakaszra felírható diszkrétidejű megmaradási egyenlet:

$$\rho(k+1) = \rho(k) + \frac{T}{L} [q_{be}(k) - q_{ki}(k) + r(k)] \quad (1)$$

Ahol:

$\rho \left[\frac{\text{egységjármű}}{\text{km}} \right]$ forgalomsűrűség

k diszkrét időperiódus,

T [sec] periódusidő,

L [m] szakaszhossz,

$r \left[\frac{\text{egységjármű}}{h} \right]$ felhajtó járművek,

$q \left[\frac{\text{egységjármű}}{h} \right]$ be- és kilépő forgalom nagyság.

A fenti állapotegyenlet (modellegyenlet) azonban nem lineáris. Így linearizálás végrehajtására van szükség, amit egy állandósult állapotbeli munkapont körül végzünk el. A munkapont a $q_{be,d}$, ρ_d , r_d értékekkel írható le, ahol d index az (desired) elérendő optimális értéket jelöli. A linearizáláshoz további ún. centrális változókat kell bevezetni:

$$\Delta\rho = \rho - \rho_d,$$

$$\Delta q_{be} = q_{be} - q_{be,d},$$

$$\Delta r = r - r_d.$$

A centralizált változókból $\rho(k)$, $r(k)$, $q_{be}(k)$ értékeit kifejezve, és a modellegyenletbe visszaírva kapjuk a következő egyenletet:

$$\rho(k+1) = \rho(k) + \frac{T}{L} [q_{be,d} + r_d - Q(\rho(k)) + \Delta q_{be}(k) + \Delta r(k)] \quad (2)$$

A választott munkapont körül linearizált állapotegyenlet így:

$$\Delta \rho(k+1) = A\Delta \rho(k) + B\Delta r(k) + B\Delta q_{be}(k) \quad (3)$$

Ahol:

$$A = 1 - \frac{T}{L} \dot{Q}(\rho_d),$$

$$B = \frac{T}{L}$$

Az LQ irányítási feladat megfogalmazása a fentiek alapján:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [Q\Delta \rho(k)^2 + R \cdot \Delta r(k)^2], \quad (4)$$

$R = 0.1$ és $Q = 1$ súlyozó mátrixok

Mint ismeretes az LQ probléma megoldása a J költségfüggvény minimalizálását jelenti. A felhajtó-korlátozó szabályozás esetén ezt az alábbi feltételek kielégítése mellett tehetjük:

- az állapotegyenlet kielégítése,
- $\Delta q_{be}(k) = 0$.

A feladat megoldása a diszkrét idejű algebrai Ricatti-egyenletből adódik:

$$A^T P A - P + Q - (B^T P A)^T (R + B^T P B)^{-1} (B^T P A) = 0 \quad (4)$$

A P kiszámítása után felírható a stabilizáló K állapot-visszacsatolás:

$$K = (R + B^T P B)^{-1} (B^T P A) \quad (5)$$

A K felhasználásával megfogalmazható a felhajtó ág irányítási szabálya:

$$r(k) = r_d - K[\rho(k) - \rho_d] \quad (6)$$

Az $r(k)$ a ciklusonkénti beengedhető forgalomnagyságot adja meg, amiből pedig már közvetlenül számítható a felhajtó-korlátozó lámpa zöldidejének hossza.

A szabályozáshoz felhasználtuk továbbá a változtatható sebességkorlátozást, mint autópálya forgalomszabályozási módszert (3. ábra).

Ez a szabályozás azon alapul, hogy az átlagsebesség csökkentésével egyidejűleg a követési távolságok is rövidülnek. Így amennyiben redukáljuk az autópályán megengedett maximális sebességhatárt, a járműsűrűség értéke megnő. Sűrűsödő forgalmi viszonyok esetén ezzel a módszerrel megakadályozható, rosszabb esetben lassítható a torlódás kialakulása, mivel a lassú vagy lassabb haladás még mindig hatékonyabb, illetve pszichológiailag is jobb hatással van a járművezetőkre, mint bármilyen torlódás, amely gyakori fékezéssel, elindulással jár.

Az összehangolt rendszerben a sebességkorlátozást egy kapcsoló szabályozó vezérli. Működését a 4. ábra szemlélteti.

3. ábra

Változtatható sebességkorlátozás



Figure 3. Variable speed limit

4. ábra

A különböző sebességekhez tartozó fundamentális diagramok

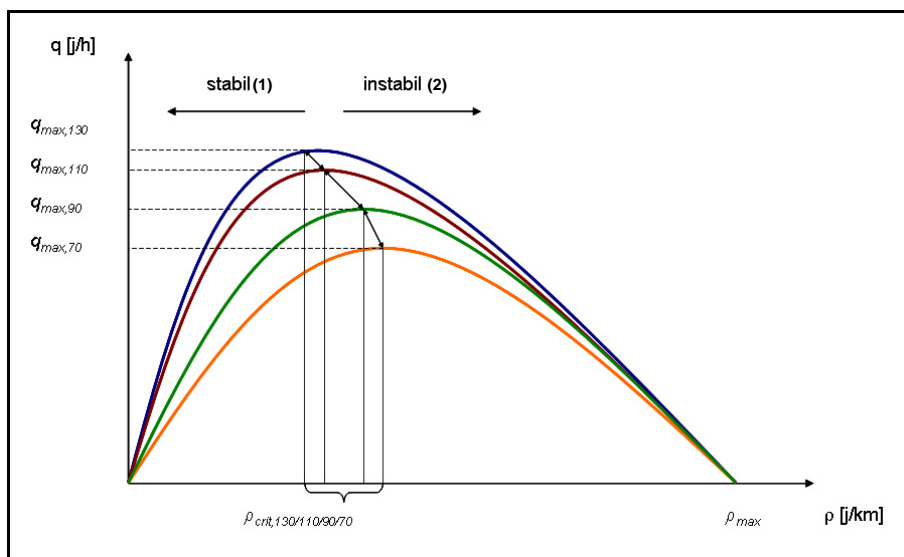


Figure 4. Fundamental diagrams which belong to the different speed limits

Stable(1), Unstable(2)

A szabályozó 70, 90, 110 és 130 [km/h]-ás sebességhatárokat tud kijelezni. Folyamatos mérések alapján igyekszik a forgalmat a fundamentális diagram stabil tartományában tartani (Siebel and Mauser, 2005). Amikor a forgalom eléri az adott szabadáramlási sebességhez tartozó kritikus értéket (a fundamentális diagram maximumát), a kijelzendő kisebb sebességgel „átkapcsolunk” az egyel alatta lévő diagramra. A kisebb sebességhatárok beiktatásával a forgalom stabil tartománya kiterjeszhető.

Az összehangolt szabályozás

A összehangolt szabályozásban az eddig bemutatott irányítási módszereket kapcsoltuk össze. A kapcsoló szabályozó az irányítandó autópálya szakasz megfigyelése alapján minden ciklusban meghatározza ($T=60$ [sec]) a forgalom stabilitását. A szabályozó a mért értékektől függően vagy tartja a megelőző sebességkorlátozó jelzést, vagy új sebességkorlátozást jelez ki. Ahhoz, hogy összehangolt legyen a rendszer, a kapcsoló szabályozó által felhasznált kritikus forgalomsűrűséget az LQ alapú felhajtó-korlátozónak is fel kell használnia a megfelelő beengedési arány kiszámításához. A rendszer működését az 5. ábra szemlélteti.

5. ábra

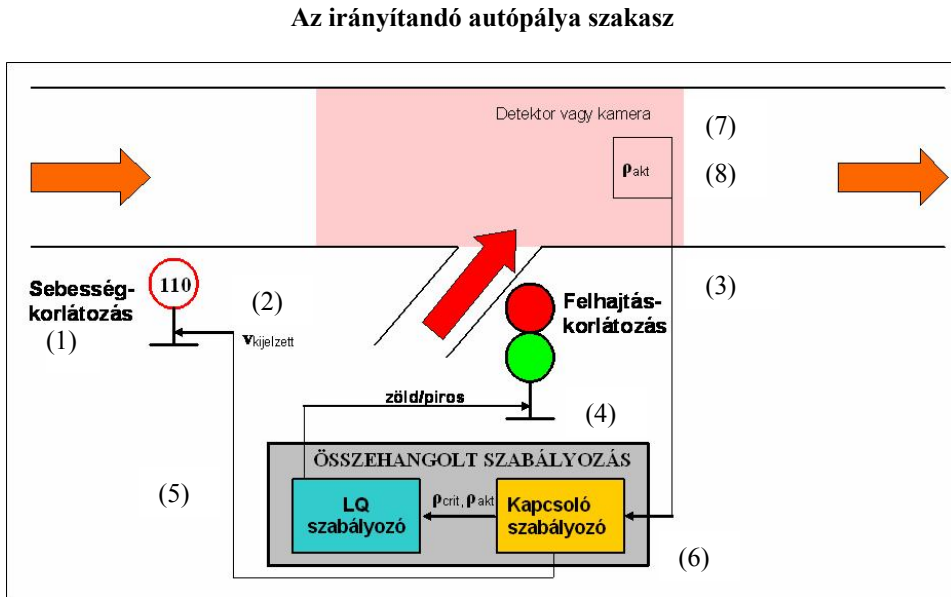


Figure 5. The controlled freeway stretch

Speed limit(1), $v_{\text{signalized}}$ (2), Ramp metering(3), Coordinated control(4), LQ control(5), Switching control(6), Detector/camera(7), v_{act} (8)

A forgalom modellezése a VISSIM (VISSIM 4.10 User Manual, 2005) mikro-szimulációs szoftver alkalmazásával történt (Sun and Horowitz, 2005, 2006). Az alkalmazott szabályozási algoritmusok komplexitása külső program alkalmazását is szükségessé tették. Így került a modellezési folyamatba a MATLAB tudományos-matematikai szoftver is, amely különösen jól alkalmazható modern irányításelmélet alapú problémák megoldásához.

EREDMÉNY ÉS ÉRTÉKELÉS

Zárthurkú közötti szimulációs rendszer

Az összehangolt irányítási stratégia vizsgálatához, teszteléséhez egy gyorsforgalmi hálózatrész modellezésére, valamint a tervezett irányítórendszerek működési modelljének megalkotására volt szükség. A modellezési lépések során sikerült egy olyan zárthurkú közötti szimulációs keretrendszert létrehozni, amely bármilyen más hálózat, ill. szabályozó rendszer modellezésének alapjául is szolgálhat.

A VISSIM forgalom-szimulációs program és a MATLAB közötti kommunikációt indirekt módon sikerült megvalósítani, mivel a VISSIM-mel „kívülről” csak COM felületen lehet kommunikálni (Roca., 2005). A szoftverek közötti kapcsolat vezérlésére így egy külön alkalmazás megírására volt szükség, amelyet Microsoft Visual C++ programnyelven készítettünk el. Az így kialakított zárthurkú szimulációs rendszert a 6. ábra szemlélteti.

6. ábra

Zárt hurkú közötti szimulációs rendszer

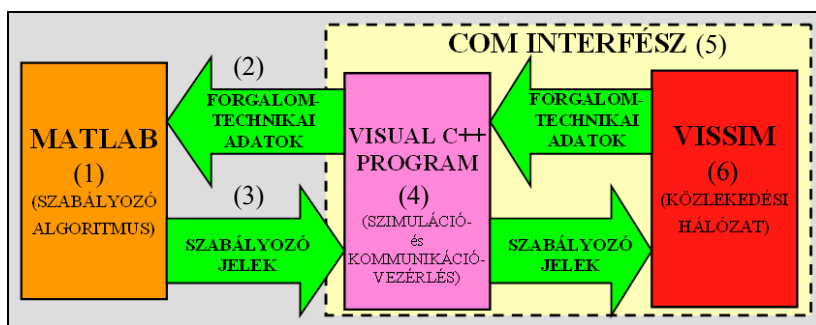


Figure 6. Closed loop road traffic simulation system

Control algorithm(1), Traffic data(2), Control input(3), Control of simulation and communication(4), COM interface(5), Traffic network(6)

A zárthurkú rendszer működése során a vezérlő program hozzáfér a VISSIM-ben futó szimuláció forgalomtechnikai adataihoz (forgalomsűrűség, átlagsebesség, jelzők állapota, stb.). A mért adatok a számítógép memóriájába kerülnek, hogy azok a MATLAB számára is elérhetőek legyenek. A szabályozási algoritmus lefutása után előállnak a hálózat számára létrehozott szabályozó jelek (fázisidők), amiket a MATLAB szövegfájlba helyez. A C++ alkalmazás pedig COM interfészen keresztül az új fázisidőknek megfelelően módosítja a forgalomirányító berendezések fázisterveit.

Szimulációs eredmények

A szabályozás eredményességének releváns vizsgálatához három különböző esetet szimuláltunk:

- forgalomáramlás szabályozás nélkül,
- forgalomáramlás felhajtás-korlátozó alkalmazásával,
- forgalomáramlás összehangolt felhajtó- és változtatható sebességkorlátozás esetén.

A szimulációs eredmények igazolják azt a feltevést, hogy a változtatható sebességkorlátozás és a felhajtó-korlátozás kombinálásával kialakított összehangolt szabályozórendszer nagyban javítja az autópálya forgalomlefolysását nem csak a kontrolálatlan, de még az egyedi szabályozáshoz képest is. A rendszerből kiáramló forgalomnagyság értéke több mint 10%-kal emelkedik (7. ábra).

7. ábra

A kihaladó forgalomnagyság változása

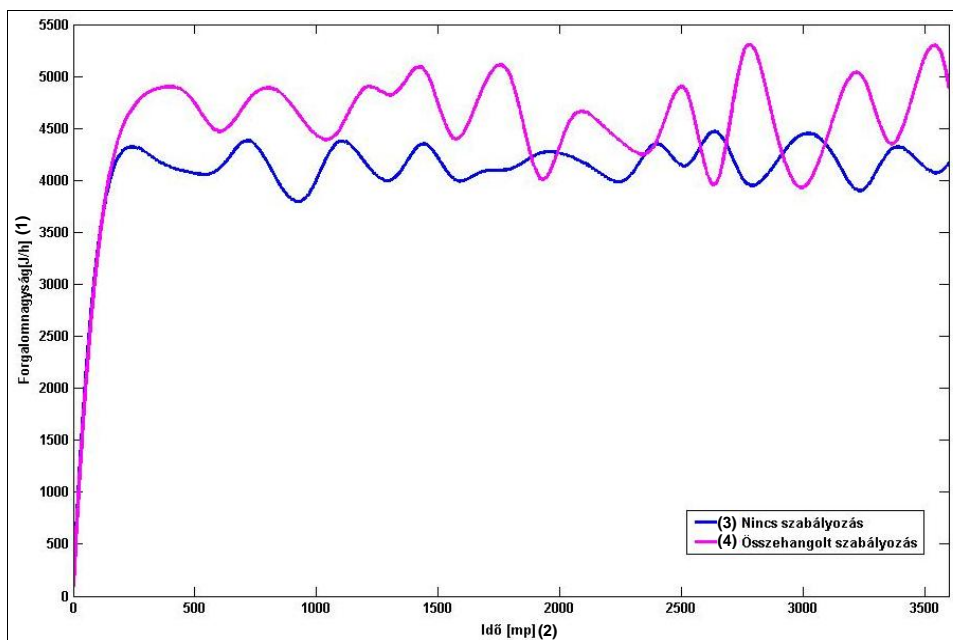


Figure 7. Leaving traffic volume

Traffic volume [veh/h](1), Time [sec](2), No control(3), Coordinated control(4)

A forgalomnagyságon túl a többi lényeges forgalomtechnikai paraméter is javulást mutat a rendszer alkalmazásakor (1. táblázat).

Az összehangolt szabályozás másik nagy előnye az áteresztőképesség növelése mellett az adaptivitási képesség, amivel ki tudja kompenzálni az esetleges nagyobb forgalomhullámzásokat is. Ezáltal egy simább forgalomlefolysást lehet elérni, ami a balesetveszély csökkenéséhez is nagyban hozzájárul.

KÖVETKEZTETÉSEK

A felépített rendszer megfelelően reprezentálja a szabályozás működését, és bizonyítja alkalmazhatóságát, amely jelentősen javítaná az autópályák hatékonyabb kapacitáskihasználását, és jó kiindulási alapja lehet bármilyen más hasonló célú fejlesztésnek.

1. táblázat

Szimulációs eredmények

Szabályozási forma (1)	q_{ki} [J/h]	v [km/h]	TTT [h]	n [db]
Nincs szabályozás (2)	4154	34	170	2.8
Felhajtó-korlátozás (3)	4514 (+8,6%)	46 (+35%)	143 (-16%)	1.3 (-50%)
Összehangolt felhajtó- és változtatható sebességkorlátozás (4)	4581 (+10%)	50 (+47%)	137 (-19%)	1.1 (-60%)

q_{ki} : a kiáramló forgalom nagyság (traffic volume); v : átlagsebesség (average speed); TTT : összes utazási idő (Total Travel Time); n : átlagos megállások száma (average number of stops); a %-os változás a szabályozatlan esethez viszonyítva értendő (the results in % show the variations compared to the non-controlled cases)

Table 1. Simulation results

Type of control(1), No control(2), Ramp metering(3), Coordinated control of ramp metering and variable speed limit control(5)

A szimulációs eredmények nyilvánvalóan eltérhetnek a valós életbeli forgalmi szituációktól, de mindenképpen irányadóak a hatékonyság javítása szempontjából. Összességében tehát elmondható, hogy bármilyen – jól működtetett - irányítási forma, eredményesen használható a forgalomkapacitás növelésére. Az ismertetett összehangolt szabályozással pedig még további javulást lehet elérni az önmagukban alkalmazott irányító berendezésekhez képest.

A bemutatott összehangolt rendszer számtalan olyan továbbfejlesztési lehetőséget tartogat magában, amivel még hatékonyabbá lehet tenni a működést. Egyrészt az irányítási algoritmus fejlesztésével (pl. Modell Predictive Control), másrészt a szabályozott rendszer kiterjesztésével (hosszabb útszakaszok) a valóságot még jobban közelítő eredményeket lehet elérni. Az irányító rendszer további szabályozó rendszerekkel való összehangolása (pl. útvonalajánlás, utazási idő kijelzés, stb.) pedig egy komplex rendszer létrehozását tenné lehetővé.

A magyar autópályákon még elég korlátozott mértékben használnak forgalomszabályozást. Ugyanakkor a motorizáció egyértelmű növekedési tendenciája és a most még leginkább városi forgalomban jellemző torlódások megjelenése, előre vetíti a modern forgalomszabályozás szükségességét.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozunk a BME Közlekedésüzemi Tanszékének, hogy a cikkben bemutatott zárt hurkú szimulációs rendszer részét képező VISSIM szoftvert rendelkezésünkre bocsátotta.

IRODALOM

Bellemans T., De Schutter B., De Moor B. (2002): Models for traffic control. Technical report bds: 01-11 Delft University of Technology, Fac. of Information Technology and Systems.

- Chu L., Yang X. (2003): Optimization of the ALINEA ramp-metering control using genetic algorithm with micro-simulation California PATH. ATMS Center, Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, USA
- Diakaki C., Papageorgiou M., McLean T. (1999): Application and evaluation of the integrated traffic-responsive urban corridor control strategy IN-TUC in Glasgow. Proceedings of the TRB 78th Annual Meeting, Washington D.C., U.S.A.
- Kachroo P., Krishen K. (2000): System dynamics and feedback control design problem formulations for real time ramp metering. Transactions of the SDPS, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- MATLAB: www.mathworks.com
- Papageorgiou M., Diakaki C., Dinopoulou V., Kotsialos A., Wang Y.(2003): Review of road traffic control strategies, Technical University of Crete, Greece, Proceedings of the IEEE, 91. 12.
- Roca V. (2005): VISSIM COM, User Manual for the VISSIM COM interface. PTV Planung Transport Verkehr AG.
- Siebel F., Mauser W. (2005): On the fundamental diagram of traffic flow. Department of Earth and Environmental Sciences, University of Munich, Germany.
- Sun X., Horowitz R. (2006): A set of new traffic-responsive ramp-metering algorithms and microscopic simulation results. Transportation Research Records (TRR), the Journal of the Transportation Research Board.
- Sun X., Horowitz R.(2005): Localized switching ramp metering control with queue length estimation and regulation and microscopic simulation results. Department of Mechanical Engineering University of California at Berkeley, USA.
- VISSIM 4.10 User Manual, www.vissim.de
- PTV Planung Transport Verkehr AG, 2005.
- Wiedemann R. (1974): Simulation des Straßenverkehrsflusses Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8.

Levelezési cím (*Corresponding author*):

Tettamanti Tamás

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Közlekedésmérnöki kar, Közlekedésautomatika Tanszék
1111 Budapest, Bertalan Lajos utca 2.
*Budapest University of Technology and Economics,
Faculty of Transportation Engineering,
Department of Transportation Automation
H-1111 Budapest, Bertalan Lajos utca 2.
Tel.: 36-1-463-013, Fax: 36-1- 463-3087
e-mail: tettamanti@mail.bme.hu*