

# MPC alapú, elosztott városi forgalomirányító rendszer

Tettamanti T.\*, Varga I.\*\*

\*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki Kar, Közlekedésautomatikai Tanszék, Budapest, H-1111 Bertalan Lajos utca 2., (e-mail: tettamanti@mail.bme.hu).

\*\* MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet, Budapest, H-1111, Kende u. 13-17., (e-mail: ivarga@sztaki.hu)

---

**Összefoglalás:** A cikkben elosztott közúti forgalomirányító rendszer fejlesztését mutatjuk be. A rendszer szabályozó algoritmus az úgynevezett modell prediktív irányításra (MPC) épül. Az MPC módszer elosztott struktúra melletti megvalósításához ugyanakkor a Jacobi iterációs módszer felhasználására is szükség van, ami gyakorlatilag egy korlátozások melletti, nemlineáris programozási feladat megoldási algoritmus. Mivel egy közlekedési hálózat forgalomirányító berendezései egyben számítógépes hálózatot is alkotnak, a működéshez szükséges számítások eloszthatók a gépek között, így központi irányítás nélkül is megvalósítható a hálózat irányítása. A fejlesztés célja – a torlódás mérséklése, az utazási idő csökkentése és a homogén forgalomáramlás megvalósítása mellett – elosztott irányítási architektúra megvalósítása. Az elosztott MPC alapú szabályozás bármilyen városi közlekedési hálózatban alkalmazható, ugyanakkor megfelelően működő mérő rendszer és korszerű forgalomirányító berendezések szükségesek a működéshez.

---

## 1. BEVEZETŐ

A modern irányításelmélet megfelelő gyakorlati alkalmazásával olyan városi forgalomirányító rendszer valósítható meg, amely teljesen forgalomfüggő módon képes szabályozni az aktuális forgalomlefordulást (Tettamanti *et al.*, 2009). A megvalósítás egyik eszköze lehet a modell prediktív szabályozás (MPC) (Garcia *et al.*, 1989), amely segítségével optimális megoldás található a csomóponti torlódások minimalizálására, ezáltal az irányított hálózat kapacitás kihasználásának maximalizálására.

A prediktív, egész hálózatra kiterjedő irányítás során a hálózathoz tartozó valamennyi jelzőlámpa jelzéstervét központilag határozzuk meg. A közlekedési rendszer modelljét és az irányítást mindenképpen az egész hálózatra célszerű együtt kezelni, hiszen a csomópontok erős hatást gyakorolnak egymásra. Az irányító rendszer kimenete a bonyolult optimalizálási folyamat során megállapított zöldidőkből felépülő jelzéstervek.

Az adaptív közúti forgalomirányítási rendszerek általában centrális felépítésűek, ahol egy központi irányító számítógéphez futnak be az egész hálózat adatai, és ugyanez a gép számítja ki az optimális jelzéstervet a hálózat összes jelzőberendezése számára. Az optimális beavatkozó jelek kiszámítása azonban nemcsak egy központi helyen történhet, hanem a számítási feladatok szétszétva is elvégezhetők. Ebben az esetben decentralizált rendszerfelépítésre van szükség.

Cikkünkben egy ilyen elosztott, prediktív szabályozás alapú városi forgalomirányító rendszert mutatunk be, amely fő

szabályozási célja a jelzőberendezések előtt sorban álló járművek számának minimalizálása.

## 2. ELOSZTOTT IRÁNYÍTÁS, MODELLEZÉS VÁROSI FORGALOMIRÁNYÍTÁSBAN

A városi közlekedési hálózatok forgalomirányító rendszerei három csoportra oszthatók felépítésük szerint: centrális, elosztott (decentralizált), ill. vegyes. A centrális irányító architektúra esetén minden döntést egy központi gép hoz, amiket aztán továbbít a terepi berendezések számára. Decentralizált irányítási architektúra esetén központi számítógép nélkül valósítható meg az irányítás, mivel a terepi gépek elosztják egymás között a szükséges számításokat. Az elosztott rendszerekben a döntések már helyben megszületnek, így „csupán” a forgalomirányító berendezésekben lévő intelligencia segítségével szabályozhatóvá válik az adott közlekedési hálózat. Az elosztott és a vegyes irányító rendszerek nem annyira elterjedtek, ugyanakkor számos műszaki előnnyel rendelkeznek a teljesen hierarchikus felépítésű rendszerekkel szemben. Nem áll fenn a központról való leszakadás veszélye, ill. nagyobb biztonságú üzemelés valósítható meg. A redundancia könnyen beépíthető az elosztott rendszerbe, ezen kívül nem áll fenn a központról való leszakadás veszélye. Jó példa elosztott rendszerekre az ausztráliai SCATS (Wolshon *et al.*, 1999), vagy az Európa több városában is működő Utopia (Utopia, 2009.).

A kutatásunk fő célja egy olyan adaptív irányítási algoritmus kifejlesztése, amely több csomópontból álló városi közlekedési hálózaton alkalmazható elosztott irányítási architektúrában. A rendszer dinamikusan képes a kereszteződések jelzésterveinek ciklusonkénti előállítására a

forgalmi helyzettől függően. Az optimalizálási feladat megoldásához az MPC módszerét alkalmazzuk, amely képes a rendszer tulajdonságiból eredő korlátokat figyelembe venni a szabályozó bemenetek, azaz a jelzésterv előállításakor, és amely elosztott rendszerbe implementálható. A szabályozási cél a sorhosszak minimalizálása.

A prediktív irányítás forgalmi paramétereket tartalmazó célfüggvénnyel fejezhető ki. Ez az ún. költségfüggvény, amely a torlódott forgalmi állapothoz egy költséget rendel. Ezt a költséget azonban nem pénzként, mint inkább matematikai fogalomként kell értelmezni. Az MPC célja ennek a költségfüggvénynek a minimalizálása, ezáltal pedig a torlódott forgalmi állapotok kialakulásának csökkentése. Természetesen az optimalizálás eredményeként áttételesen gazdasági nyereséghez is jutunk, de a költségfüggvényben nem közvetlenül pénzügyi költségeket jelenítünk meg.

Hatékony szabályozás tervezéséhez, és működtetéséhez elengedhetetlen egy megfelelő forgalommodell felhasználása. Modell alkalmazásával megvizsgálható és kiértékelhető a közlekedési folyamatok pontos dinamikája. Számos forgalommodell létezik. A modellek tulajdonságaik szerint csoportosíthatók (Bellemans *et al.*, 2002). Az állapottér alapú forgalommodellek adaptív szabályozási módszerekkel kombinálva írják le a forgalmat. Így a rendszerünkben is állapottér alapú megközelítést alkalmazunk, az ún. store-and-forward modellt (Gazis, 1976). Hasonló működik a TUC (Diakaki *et al.*, 2003) forgalomirányító rendszerben is.

A store-and-forward modell a közlekedési folyamatok dinamikai leírásához az alábbi diszkrét idejű, lineáris, időinvariáns állapottér egyenletet használja fel:

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \left[ (1 - \kappa_{z,0}) \sum_{w \in I_M} \alpha_{w,z} \frac{S_w \sum_{i \in v_w} g_{M,i}(k)}{C} - \frac{S_z \sum_{i \in v_z} g_{N,i}(k)}{C} \right] \quad (1)$$

Ahol  $M$  és  $N$  a hálózaton belüli  $z$ -ik szegmens két végén található csomópontok indexei,  $x(k)$  állapot vektor az egyes csomóponti ágakban álló járművek számát tartalmazza,  $g(k)$  a szabályozó bemenet (zöldidők),  $S$  a telítettségi forgalomnagyság,  $C$  a ciklusidő,  $T$  a szabályozási intervallum,  $k=1,2,\dots$  a diszkrét időindex,  $j$  index a csomópontokat definiálja, és  $i$  index pedig a csomóponti irányokat adja meg.

A fordulási ráták értékei erősen befolyásolják a rendszer működését. Értékük pontos ismerete fontos probléma a szabályozás tervezésében. Mivel a fordulási ráták nem egyszerűen mérhető paraméterek, jó megoldás lehet becslési algoritmus alkalmazása. Az (1)-es képletben  $\alpha_{w,z}$  a belépő fordulási ráta,  $\kappa$  pedig a kilépési ráta, amelyeket ismertnek tekintünk.

Minden csomópont ciklusideje és veszteségideje rögzített.

Ezáltal a zöldidők összegei is állandók. Az állapot és a kimeneti egyenletek általánosan az alábbi összefüggéssel írhatók le:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bg(k) + x_{in}(k) + w(k) \\ y(k) &= Cx(k) + v(k) \end{aligned} \quad (2)$$

ahol  $w$  a nem mérhető hibák összege, valamint  $v$  a mérési zaj. A közlekedési hálózat határain jelentkező belépési igényt mérhető hibának tekintjük ( $x_{in}$ ).

### 3. PREDIKTÍV OPTIMALIZÁLÁS JACOBI ALGORITMUSAL

A prediktív szabályozási probléma egy olyan költségfüggvény minimalizálását jelenti, amely tartalmazza az irányított rendszer állapotait. A szabályozó rendszer tervezésének első lépése a közlekedési hálózat állapottér reprezentációjának megalkotása. Az állapotegyenlet mérhető forgalomtechnikai paraméterek alapján felírható. A költségfüggvény ezen állapottér egyenlet mátrixait tartalmazza. A prediktív algoritmus végső célja a sorban álló járművek számának minimalizálása, ami a hálózaton áthaladó járművek maximalizálását jelenti.

#### 3.1 Az MPC költségfüggvény felírása

Az MPC állapottér egyenlet az alábbiak szerint adható meg:

$$\begin{bmatrix} x[k+1|1] \\ x[k+1|2] \\ \vdots \\ x[k+1|N] \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} x[k] + x_{in}[k] \\ x[k] + 2x_{in}[k] \\ \vdots \\ x[k] + Nx_{in}[k] \end{bmatrix}}_{c(k)} + \underbrace{\begin{bmatrix} T & 0 & \cdots & 0 \\ T & T & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T & T & \cdots & T \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} g[k|0] \\ g[k|1] \\ \vdots \\ g[k|N-1] \end{bmatrix}}_{g(k)} \quad (3)$$

A  $k=1,2,\dots$  időindex a diszkrét lépésközt jelenti. Az  $x(k+1)$  hipervektor állapotvektorokból áll, amelyek a hálózat csomóponti ágaiban álló járművek számát reprezentálják. A  $c(k)$  hipervektor az előző lépésbeli állapot vektorok és a szabályozott közlekedési hálózatba belépő járműszám vektorok kombinációja ( $x_{in}$ ).  $B$  egy alsó háromszög hipermátrix, amely elemei a fordulási rátákat tartalmazó  $T$  mátrixok. A  $T$  mátrix minden egyes sora egy irányított csomóponti ágnak felel meg. Eszerint a mátrix adott sora a hozzá tartozó csomóponti ág összes - oda érkező, ill. onnan kihaladó - fordulási rátáját tartalmazza. A  $g(k)$  hipervektor a szabályozó bemeneteket (zöldidők) tartalmazó vektorokból áll.  $N$  a prediktív irányítás horizontját jelenti.

Az MPC költségfüggvény a súlyozott rendszerállapotok és a szabályozó bemenetekkel írható fel:

$$J(k) = \frac{1}{2} \{ q x^T(k) x(k) + r g^T(k) g(k) \} \rightarrow \min \quad (4)$$

A költségfüggvény minimalizálása a kereszteződéseken áthaladni szándékozó, sorban álló járművek számának minimalizálását jelenti. A zöldidőket a rendszer az aktuális forgalmi állapotoknak megfelelően, teljesen adaptívan határozza meg minden ciklusban. A (4)-es képletben felhasznált  $q=0.1$  és  $r=1$  szorzók súlyozó paraméterek. A költségfüggvény  $q$  és  $r$  szerinti megfelelő behangolása különösen fontos, mivel erősen befolyásolják a zárt szabályozási hurok stabilitását (Kwon *et al.*, 1978).

A  $J(k)$  funkcionál minimalizálására a szakirodalomban számos megoldás létezik (Kwon *et al.*, 1978). Az általunk tervezett MPC szabályozó egy előre meghatározott, irányítható halmazt használ fel, ami a stacionárius LQR probléma CARE (Control Algebraic Riccati Equation) egyenletének megoldásán alapul (Rawlings *et al.*, 1993). Az algebrai Riccati egyenlet megoldásával meghatározható az az állapothalmaz, amelynek elemeire biztosított a rendszer stabilitása. Az állapottér ezen irányítható halmaza megfelel a szabályozó bemenetre vonatkozó korlátozásoknak. A véges horizontú minimalizálás optimális állapot visszacsatolást valósít meg.

Az  $x(k)$  és  $g(k)$  hipervektorokat a (4)-es képletbe helyettesítve az alábbi összefüggést kapjuk:

$$J(k) = \frac{1}{2} g^T (qB^T B + rI) g + qc^T Bg + \frac{1}{2} qc^T c \rightarrow \min \quad (5)$$

A szorzásokat és az összeadást elvégezve:

$$J(k) = \frac{1}{2} g^T \Phi g + \beta^T g + \gamma \rightarrow \min$$

amiből  $\gamma$  elhagyható, mivel konstans értékű. A minimalizálandó célfüggvény végső formája így a következő:

$$J(k) = \frac{1}{2} g^T(k) \Phi g(k) + \beta^T(k) g(k) \rightarrow \min \quad (6)$$

$$\text{ahol } \Phi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \cdots & \varphi_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{n1} & \cdots & \varphi_{nn} \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}.$$

$\Phi$  egy konstans mátrix, mivel elemei a rögzített értékű fordulási ráták és a súlyozó paraméterek kombinációi. A  $\beta$  oszlopvektor viszont ciklusonként változik. Elemi a közlekedési hálózat állapotainak változását tükrözik.

### 3.2 A rendszerre vonatkozó korlátozások

A már említett TUC rendszer célja a járműszám minimalizálása és egyenletes elosztása a szabályozott közlekedési hálózatban. A TUC alapkoncepciója az LQR elméletére épül. Így az optimalizálási algoritmus során nem tudja figyelembe venni a rendszer korlátait. A prediktív szabályozás viszont képes a korlátozások kezelésére.

Városi közlekedési hálózatban két fő korlátozással kell számolni. Az első az egy csomóponton belüli zöldidők összegére vonatkozó maximális érték, amely - a ciklusidőn túl - teljes mértékben az adott kereszteződés geometriájától függ. Ezt fejezi ki a (7)-es egyenlőtlenség.

$$\sum_{i=1}^{O_j} g_i \leq t_j^{MAX} \quad j = 1 \dots J, \quad (7)$$

ahol  $O_j$  a  $j$ -ik csomópontához tartozó irányított járműoszlopok száma,  $J$  pedig a jelzőlámpás kereszteződések száma az irányított hálózatban.

A rendszerre vonatkozó másik korlátozás a zöldidők pozitivitása:

$$g_i \geq 0 \quad \forall i \quad (8)$$

Erre azért van szükség, mivel az optimalizáló algoritmus gyakorlatilag egy lineáris egyenletrendszer megoldását jelenti (lásd 3.3 fejezet), amelynek végeredményében negatív értékek is megjelenhetnek.

A (7)-es és (8)-as korlátozások egy lineáris mátrix egyenlőtlenségként is kifejezhetők:

$$Ag \leq b \quad (9)$$

A mátrix egy két részből álló hipermátrix, amelynek felső blokkja a (7)-es egyenletnek megfelelően a zöldidők lineáris kombinációit tartalmazza. Az A alsó blokkja egy negatív egység mátrix, amellyel a (8)-as szerinti korlátozás tartható be.

$$A = \left[ \begin{array}{cccccc|cccc} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & & & & & \ddots & & \vdots \\ 0 & \cdots & & & & & & & & \cdots & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & & & & & & \\ 0 & -1 & 0 & \cdots & & & & & & & \\ 0 & 0 & -1 & & & & & & & & \\ \vdots & & & \ddots & & & & & & & \end{array} \right]$$

A  $b$  hipervektor az A-nak megfelelően két vektorra bontható, ahol a felső rész a csomópontonkénti zöldidők összegének felső korlátait tartalmazza. Az alsó rész pedig nullvektor, ami így biztosítja a zöldidők pozitivitásának feltételét.

$$b = \begin{bmatrix} t_1^{MAX} \\ t_2^{MAX} \\ \vdots \\ t_J^{MAX} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

A prediktív szabályozás felhasználásával ciklusonként dinamikusan meghatározható a forgalomirányító berendezések jelzésterve a (9)-es egyenlőtlenség figyelembe vétele mellett.

A prediktív szabályozó a sorban álló járművek számát igyekszik csökkenteni, ami a  $J(k)$  költségfüggvény (6) minimalizálását jelenti. Mindezt úgy, hogy  $J(k)$  kielégíti a (2)-es állapotegyenletet és a (7)-es, ill. (8)-as korlátokat.

### 3.3 Többváltozós, nemlineáris programozás

Az MPC költségfüggvény (7) minimalizálása többváltozós, nemlineáris programozási problémaként értelmezhető – a (9)-es egyenlőtlenség átrendezésével kapott – lineáris korlátozások mellett. Ez általánosan egy kvadratikus optimalizálási problémaként írható fel (Bertsekas *et al.*, 1997):

$$\begin{cases} J(k) = \frac{1}{2} g^T \Phi g + \beta^T g \rightarrow \min \\ Ag - b \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

Amennyiben  $\Phi$  pozitív szemidefinit mátrix (sajátértékei nem negatívak), a (10)-es összefüggés egy konvex optimalizálási probléma (Boyd *et al.*, 2004). Mivel  $\Phi$  az irányítandó rendszer geometriájától függ, azaz  $B$  konstans mátrixtól (3), így „kiszámíthatatlan”, hogy a szemidefinit feltétel teljesül-e. A konvexitás feltételére a választott megoldási algoritmus miatt van szükségünk.

Amennyiben a feltétel nem áll fenn, szinguláris érték szerinti felbontást alkalmazhatunk a  $B$  mátrixra. Ez azt jelenti, hogy a  $B$  mátrixot megfelelő numerikus algoritmus alkalmazásával három speciális tulajdonságú mátrix szorzataként tudjuk kifejezni :

$$B = USV^T \quad (11)$$

$U$  és  $V$  unitér mátrixok ( $V^{-1} = V^T$ ,  $U^{-1} = U^T$ ).  $S$  pedig egy nem negatív elemű diagonálmátrix, amely a  $B$  mátrix sajátértékeit tartalmazza.

$$S = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 \\ 0 & s_2 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix}$$

A szinguláris érték szerinti felbontás után újra tudjuk definiálni az MPC állapottér egyenletet, úgy hogy  $B$  helyére  $S$  mátrixot írjuk (3)-as összefüggésbe:

$$x(k+1) = c(k) + USV^T g(k) \quad (12)$$

Ezek után a

$$\hat{g} = V^T g \quad (13)$$

összefüggést felhasználva, és  $U^T$  mátrixszal szorozva a (12)-es egyenletet, az alábbi módosított állapotegyenlethez jutunk:

$$\hat{x}(k+1) = \hat{c}(k) + S\hat{g}(k) \quad (14)$$

A (13)-as egyenlet miatt természetesen a (9)-es mátrixegyenlőtlenséggel felírt korlátozások is módosulnak.

A (14)-es összefüggés nem más, mint az eredeti (3)-as egyenlet lineáris transzformációja, tehát az erre felírt kvadratikus optimalizálási feladat is csupán egy lineáris transzformációja lesz az eredeti (10)-es problémának:

$$\begin{cases} J(k) = \frac{1}{2} \hat{g}^T \Phi \hat{g} + \beta^T \hat{g} \rightarrow \min \\ A\hat{g} - \hat{b} \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

Ugyanakkor a  $\Phi$  biztosan pozitív szemidefinit mátrix lesz, mivel  $S$  pozitív elemű diagonálmátrix.

Az előzőekben leírt átalakítással tehát a (10)-es összefüggés egy olyan lineáris transzformációjához jutunk, amely már konvex probléma.

Az egyszerűbb jelölések alkalmazása miatt a továbbiakban feltételezzük, hogy a (10)-es kifejezés alpból egy konvex optimalizálási probléma.

A megoldás folytatásához a dualitás elméletét használjuk fel (Bertsekas *et al.*, 1994). A (10)-es primál probléma ún. Lagrange-féle duál alakra hozható. A Lagrange-dualitás alap gondolata, hogy a korlátozásokat a célfüggvény kibővítésével vesszük figyelembe. Ez lesz az optimalizálási probléma Lagrange egyenlete:

$$L(g, \lambda) = J(k) + \lambda^T (Ag - b) \quad (16)$$

$\lambda_i$  Lagrange társvaltozó az  $i$ -ik egyenlőtlenségi korlát szorzója. A duál függvény a Lagrange egyenlet minimumaként határozható meg, ami könnyen kiszámítható, amennyiben a Lagrange egyenlet gradiensét egyenlővé tesszük nullával:

$$\nabla_g L(g, \lambda) = 0 \quad (17)$$

Így egy optimális zöldidőket tartalmazó vektorhoz (20) jutunk, ami minimalizálja a primál problémát. A számítások

elvégzésével a kvadratikusan optimalizálási probléma duálisához jutunk:

$$\begin{cases} J_{DUAL}(k) = \frac{1}{2} \lambda^T P^T \lambda + w^T \lambda \rightarrow \min \\ \lambda \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

ahol  $P$  mátrix és  $w$  vektor az eredeti probléma elemeiből írható fel:

$$\begin{aligned} P &= A\Phi^{-1}A^T \\ w &= A\Phi^{-1}\beta + b \end{aligned} \quad (19)$$

Bizonyítható, hogy ha  $\lambda^*$  optimális megoldást nyújt  $J_{DUAL}(k)$  számára, akkor

$$g^* = -\Phi^{-1}(\beta + A^T \lambda^*) \quad (20)$$

ugyancsak az optimális megoldását adja a primál feladatnak (Rockafellar, 1970).

Mint látható, a duális probléma (14) a primál feladathoz képest jóval egyszerűbb korlátozást tartalmaz: a megoldás nem negatív halmazon keresendő. A duális feladat gyakorlatilag a (21)-es lineáris egyenletrendszer megoldására redukálódik – a pozitivitás feltétele mellett.

$$P\lambda = w \quad (21)$$

Számos numerikus algoritmus létezik a fenti probléma megoldásához. A rendszerünkhöz a Jacobi iterációt választottuk, amely hatékonyan képes megoldani az optimalizálási problémánkat. Mivel  $\Phi$  pozitív szemidefinit mátrix  $P$  mátrix  $j$ -ik diagonál eleme is pozitív.

$$p_{jj} = a_j^T \Phi^{-1} a_j \quad (22)$$

Ez azt jelenti, hogy a duál függvény is szigorúan konvex (Bertsekas *et al.*, 1997). A szigorú konvexitási feltétel teljesülésével alkalmazható a nemlineáris Jacobi algoritmus. Mivel a duál feladat szintén kvadratikusan, az iteráció explicit módon felírható. Figyelembe véve a duál függvény első parciális deriváltját (23), a módszer a (24)-ik egyenlettel írható fel.

$$w_j + \sum_{k=1}^n p_{jk} \lambda_k \quad (23)$$

$$\lambda_j(t+1) = \max \left\{ 0, \lambda_j(t) - \frac{\kappa}{p_{jj}} \left( w_j + \sum_{k=1}^n p_{jk} \lambda_k(t) \right) \right\}, \quad (24)$$

$$j = 1, \dots, n$$

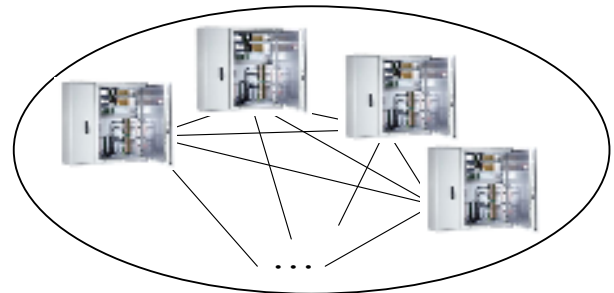
$\kappa$  egy pozitív értékű, súlyozó paraméter. Az iterációban konvergencia biztosítható, amennyiben  $\kappa = n^{-1}$ . Ugyanakkor

nem érdemes ennyire kis értéket választani, mivel ez általában szükségtelenül lassítja az iterációt.

A Jacobi iterációs módszer fontossága a hatékonyságán túl az, hogy képes pozitív megoldást találni, mivel a (24)-es egyenlet kizárja a negatív értékeket. A prediktív szabályozási folyamat során tehát minden ( $k$ -ik) lépésben kiszámíthatók az optimális zöldidők, közvetlenül a (20)-as képlet segítségével a (10)-es probléma megoldását követően.

#### 4. ELOSZTOTT RENDSZERŰ, PREDIKTÍV FORGALOMIRÁNYÍTÓ RENDSZER

A fent leírt irányítási módszer önmagában is korszerű technológia. A rendszer innovativitását azonban tovább növeli az a lehetőség, hogy a szabályozás elosztott architektúrában is alkalmazható. A rendszer bármilyen városi közlekedési hálózatban működtethető, ugyanakkor folyamatos, releváns mérési adatok és korszerű forgalomirányító berendezések szükségesek a működéshez. Az üzemelés központi irányítás nélkül is megvalósítható. Az elosztott irányítási architektúrát a 1. ábra szemlélteti. A szükséges számításokat a forgalomirányító berendezések processzorai végezhetik.



1. ábra: Forgalomirányító berendezések decentralizált közlekedési hálózatban

A terepi berendezéseknek számos „hagyományos” üzemelési feladatot kell ellátniuk (izzók ellenőrzése, detektor adatok feldolgozása, a gép szoftverének és hardvereinek ellenőrzése, stb.). Decentralizált irányítási architektúrában ugyanakkor az adaptív forgalomirányításhoz szükséges számításokat is a berendezések végzik minden ciklusban. Így az alapfunkciók mellett megmaradó számítási kapacitást kell a gépeknek kihasználni. A terhelést tehát ésszerűen a berendezések kapacitásával arányosan érdemes szétosztani.

Mivel az optimalizáláshoz alkalmazandó Jacobi algoritmus egy iterációs folyamat, az elosztott számítás könnyen megvalósítható – a gépek közötti megfelelő minőségű kommunikációs rendszer megléte esetén.

A szabályozási folyamat a forgalomirányító berendezések között minden ciklus végén fut le az alábbiak szerint:

- (1) Mérési adatok átadása: az  $i$ -ik ciklus végén a gépek elküldik egymásnak mérési eredményeiket (a csomóponti ágakban várakozó járművek száma).

- (2) Az optimalizáló eljáráshoz szükséges számítások elvégzése: láncszerűen, meghatározott iterációs lépés után a berendezések továbbítják számítási eredményeiket a következő gép számára.
- (3) Számított eredmények (optimális zöldidők) átadása egymásnak.
- (4) Jelzésterv előállítás: minden berendezések előállítja az  $i+1$ -ik ciklus jelzéstervét

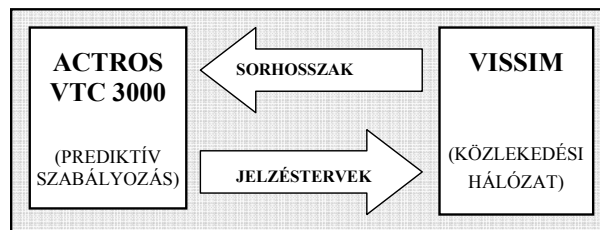
Decentralizált rendszerben működő, nagyobb közlekedési hálózat esetén, a forgalomirányító gépek elosztott irányítását kell megvalósítani a szükséges számítási igény miatt. A rendszer állapotok (irányított csomóponti ágak száma) növelésével párhuzamosan a számítási igény négyzetesen nő. Így nagyobb hálózat esetén az elosztott működés alkalmazása indokolt. Ugyanakkor a rendelkezésre álló forgalomirányító berendezések teljesítménye is erősen befolyásolhatja az elosztott működés szükségességét.

Amennyiben csak néhány csomópontból álló közlekedési hálózatot szeretnénk irányítani prediktív módszerrel, az elosztott megoldás nem feltétlen szükséges. Mivel egy Jacobi iterációs lépés kiszámítása skalár értékek egyszerű összeadásait és szorzásait jelenti, kis hálózat esetén egy darab forgalomirányító berendezés teljesítménye is elegendő az összes kereszteződés optimális zöldidőinek kiszámításához. Például egy négy csomópontos hálózat számára a számítási idő kevesebb, mint fél másodperc korszerű gép alkalmazása esetén (lásd 5. fejezet). Ez esetben a rendszer redundanciával dolgozhat, ami a rendszer megbízhatóságát növeli.

## 5. A PREDIKTÍV SZABÁLYOZÁS TESZTELÉSE FORGALOMIRÁNYÍTÓ BEREDEZÉSEN

Egy közlekedési hálózatban általában minden irányított csomóponthoz külön forgalomirányító berendezés tartozik. Ugyanakkor a korszerű gépek egyszerre több csomópont irányítására is alkalmasak. Az ACTROS VTC 3000 (ACTROS, 2009) például egyszerre három kereszteződés szabályozására is képes. Ezt a berendezést használtuk az irányító algoritmusunk tesztelésére is. Az ACTROS JAVA program alapú gép. Így egy JAVA program elkészítésére is szükség volt a prediktív szabályozás futtatásához.

A teszteléshez valós forgalomirányító berendezés mellett a VISSIM (VISSIM, 2009) mikroszkopikus forgalom-szimulációs szoftvert is felhasználtuk. A VISSIM-mel egy 4 kereszteződésből álló teszthálózatot (12 irányított csomóponti ág) készítettünk a prediktív irányító rendszer szimulációjához. A forgalomirányító berendezést és a PC-én futó VISSIM-et LAN kommunikációval kapcsoltuk össze – így szimulálva egy forgalomirányító rendszert (lásd 2. ábra).



2. ábra: ACTROS-VISSIM szimulációs rendszer

Az ACTROS a VISSIM-ből megkapja a teszthálózat mérési adatait. A prediktív szabályozó a költségfüggvény minimalizálása, és az optimális jelzésterv előállítása után visszaküldi az új beavatkozó jeleket a szimulációs szoftverhez. A szabályozási folyamat ciklusideje 60 másodperc.

Az ACTROS VTC 3000 gond nélkül üzemel a prediktív algoritmusmal. Megfelelően el tudja látni a teszthálózat irányítását. Az szabályozási folyamat számítási ideje kevesebb, mint fél másodperc. Az eredmények azt mutatják, hogy néhány csomópontból álló hálózat irányításakor a számítási igény valóban rendkívül alacsony egy korszerű gép alkalmazása esetén, így nem feltétlen szükséges elosztott számítás alkalmazása.

A tesztelés során külön gondot fordítottunk a Jacobi iteráció (24)  $\kappa$  súlyozó paraméterének megfelelő beállítására, hiszen az nagymértékben befolyásolja a rendszer számítási sebességét. Mint azt a 3.3 fejezetben már leírtuk, az iterációban konvergencia biztosítható, amennyiben  $\kappa = n^{-1}$ . Ugyanakkor ezzel az értékkel túl nagyvá válhat a lépésszám, így szükségtelenül lelassul az iteráció. A  $\kappa$  értékét tehát tapasztalati úton érdemes beállítani. Az 1. táblázatban látható értékek a konvergenciához szükséges lépésszám változását mutatják a  $\kappa$  függvényében. A teszthálózatunk esetében az ideális érték  $\kappa = n^{-0.0525}$ -nél található.

$\kappa$	Lépésszám
$n^{-1}$	6000
$n^{-0.5}$	1000
$n^{-0.1}$	200
$n^{-0.0525}$	150

1. táblázat: A konvergenciához szükséges iterációs lépésszám

## 6. ÖSSZEFOGLALÓ

A prediktív szabályozás elméletének felhasználásával olyan adaptív városi forgalom-szabályozás valósítható meg, amely decentralizált irányítási architektúrájú közlekedési hálózatban is alkalmazható. A prediktív szabályozás alapú forgalomirányító rendszer a zöldidőkre vonatkozó korlátok figyelembe vétele mellett képes a célfüggvény minimalizálására. Az optimalizálási probléma matematikailag egy többváltozós, nemlineáris programozási feladatként értelmezhető. A célfüggvény konvexitásának feltétele esetén

a megoldáshoz Jacobi iteráció alkalmazható.

Egy közlekedési hálózat forgalomirányító berendezései gyakorlatilag számítógépes hálózatot alkotnak. Így megfelelő mérő-, és kommunikációs rendszer esetén a működéshez szükséges számítások arányosan szétoszthatók a gépek között.

A prediktív irányítás globális célja a homogén forgalomáramlás megvalósításával a torlódások megelőzése vagy mértékének csökkentése.

A szabályozást forgalom-szimulációs szoftver és korszerű forgalomirányító berendezés segítségével teszteltük. A tesztrendszer optimális működésének beállításához az elmélet felhasználásán túl „kézi” hangolásra is szükség volt. Fontos tehát megjegyezni, hogy az általunk kifejlesztett irányítás egy elméleti megközelítés, amelynek a gyakorlatba való átültetése számos mérnöki feladatot von maga után, és nagyban függ az adott közlekedési hálózat sajátosságaitól.

## 7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikkben bemutatott kutatásokat az OTKA CNK 78168 pályázat támogatta.

## 8. IRODALOM

- ACTROS traffic controller, Description available: <http://www.signalbau-huber.hu/pageVilatiEnglisch/indexEnglish.htm>
- BOYD, S. – VANDENBERGHE, L.: *Convex optimization*, Cambridge University Press, ISBN 0 521 83378 7, 2004
- BELLEMANS, T. – DE SCHUTTER, B. – DE MOOR, B.: *Models for traffic control*, Technical reports bds: 01-11, Delft University of Technology, Fac. of Information Technology and Systems, 2002
- BERTSEKAS, D. P. – TSITSIKLIS, J. N.: *Parallel and distributed computation: Numerical methods*, ISBN 1-886529-01-9, 731 pages, 1997
- DIAKAKI, C. – DINOPOULOU, V. – ABOUDOLAS, K. – PAPAGEORGIOU, M. – BEN-SHABAT, E. – SEIDER, E. – LEIBOV, A.: *Extensions and new applications of the Traffic Control Strategy TUC*, TRB 2003, doi:10.3141/1856-22 2003
- GARCÍA, C. E. – PRETT, D. M. – MORARI, M.: *Model predictive control: Theory and practice - A survey*, Automatica, vol. 25, no. 3, pp. 335-348, doi:10.1016/0005-1098(89)90002-2, May 1989
- GAZIS, D. C.: *Optimal control of oversaturated store-and-forward transportation networks*, Transp. Sci. 10, 1-9, doi:10.1287/trsc.10.1.1, 1976.
- KULCSÁR, B., – VARGA, I. – BOKOR, J.: *Constrained Split Rate Estimation by Moving Horizon*, 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 2005.
- KWON, H. K. – PEARSON, A. E.: *On Feedback Stabilization of Time-Varying Discrete Linear System*, IEEE Trans. Autom. Control, 23\_3\_, pp.479–481., 1978.
- RAWLINGS, J. B. – MUSKE, K. R.: *The Stability of Constrained Receding Horizon Control*, IEEE Trans.

Autom. Control, 38\_10\_, pp. 1512– 1516., doi:10.1109/9.241565, 1993

ROCKAFELLAR, R. T.: *Convex analysis*, Princeton University Press, 1970

TETTAMANTI, T., VARGA I.: *Városi forgalomirányító rendszer prediktív szabályozással*. Városi Közlekedés, XLIX. évfolyam 3. szám, 2009/június

UTOPIA: <http://www.peektraffic.nl/page/722>

VISSIM, PTV AG., Available: [www.vissim.de](http://www.vissim.de)

WOLSHON, B. – TAYLOR, W. C.: *Analysis of intersection delay under real-time adaptive signal control*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 7 No. 1, doi:10.1016/S0968-090X(99)00011-X, 1999