



Korszerű forgalomirányító rendszerek leírása állapotterben

Luspay T., Varga I.

Magyar Tudományos Akadémia, Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézet, Rendszer- és Irányításelméleti
Laboratórium, Budapest, 1111 Kende utca 13-17.

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk a közúti automatizálás kérdéseinek korszerű rendszer- és irányításelméleti megközelítését mutatja be. A közúti folyamatok modellezése a közlekedési folyamatok speciális tulajdonságait figyelembe véve, klasszikus forgalomtechnikai összefüggésekkel történik. Az ily módon felírt matematikai egyenletek változóit rendszerelméleti szempontból állapotokra, illetve be- és kimenetekre oszthatjuk fel, ezzel egy általános dinamikus rendszerleíráshoz jutunk, a közúti forgalmi rendszerek állapotter modelljéhez. A cikk első része ezeket a modelleket mutatja be saját szimulációs eredményekkel; a városi és az autópálya forgalom leírását állapotterben. Amennyiben rendelkezésünkre állnak a megfelelő modellek, úgy alkalmazhatjuk rá a modern és posztmodern irányításelmélet eszközeit, tervezhetünk irányításokat és ún. megfigyelőket. Ezek az eszközök képesek sokkal összetettebb feladatok optimális megvalósítására, melyeket hagyományos eszközökkel nem, vagy csak korlátozott módon tudunk végrehajtani. Az cikk második része a közúti változók becslésének eljárását mutatja be, ismertetve az abban elért eredményeket. Ezek az eljárások lehetővé teszik a rendelkezésre álló adatok megsokszorozását, melyeket később felhasználhatunk az irányítás során. Ezt tárgyalja a cikk harmadik része, melyben a közúti folyamatok állapotterben történő irányításának kérdései és néhány esetben válaszai is bemutatásra kerülnek. Először a városi jelzőlámpás forgalomirányítás egyedi és összehangolt vezérlésének irányításelméleti módszerekkel történő megvalósításáról esik szó, melyek bizonyítottan nagyobb áteresztőképességet tesznek lehetővé, mint a klasszikus eljárások. Továbbá a hazánkban még kevésbé ismert autópálya forgalomirányítás módszerei is ismertetésre kerülnek. Szimulációs eredményekkel mutatjuk be, hogy milyen módon javítja az autópályák forgomleflyását a bemutatásra került irányítási eszközök koordinált használata.

(Kulcsszavak: állapotter-elmélet, közúti közlekedés, állapotbecslés, forgalomirányítás.)

ABSTRACT

Modern traffic control systems in state-space approach

T. Luspay, I. Varga

Hungarian Academy of Sciences, Computer and Automation Research Institute, System and Control Laboratory
H-1111 Budapest, Kende str. 13-17.

The paper deals with the modern system and control theoretical approach of road traffic automation. Classical road traffic modelling takes the special characteristics into consideration, which mathematical equations could be cast into a general state-space form of dynamical systems. The first section of the paper introduces the state-space model of

urban intersections and of freeway traffic flow; the paper also shows the simulation results of these models. Based on these state-space models one could apply the results of the modern and post-modern system- and control theory; one could develop so called observers and optimal control strategies for road traffic systems. The second part of the paper negotiates the results in estimation procedures of road traffic variables. These procedures multiply the available data set which could be used through the controller design procedure. The third part of the paper shows the control problems of road traffic systems. First a simply urban intersection control then the problem of coordinated intersection control has been investigated. The simulation results are quite promising in both cases. Finally the problem of freeway traffic control has been discussed, the paper shows the simulation results of how the coordinated freeway control could prevent traffic breakdown.

(Keywords: state-space theory, road traffic, state estimation, traffic control.)

BEVEZETÉS

Napjaink növekvő forgalmi teljesítményei növekvő igényeket támasztanak a közúti közlekedési rendszerekkel szemben is. A szűk átérésztőképességek illetve balesetek, okozta torlódások mindennaposá váltak, melyek így késésekkel, környezeti, egészségi valamint gazdasági károkkal járnak együtt. A probléma megoldására alapvetően két megoldás nyílik: a közlekedési infrastruktúrák növelése (új utak építése), illetve korszerű irányító rendszerek kifejlesztése és alkalmazása. Az első megoldásnak anyagi és természetbeli korlátai vannak, továbbá csak átmenetileg orvosolná a problémát. A második megoldáshoz azonban alapvető szemléletváltás szükséges. Magyarországon a jelenleg is alkalmazott közúti forgalomfüggő irányítás követési időközön alapuló stratégiája számos esetben nem bizonyul megfelelőnek, hiszen a rendszer csak előre definiált helyzetek kezelésére képes, váratlan eseményekre nem. Ezek a tényezők vezettek egy korszerű, új megközelítéshez, melyel ezek a problémák egy része megoldható. Az 1960-as évektől folyamatosan fejlődő irányításelméleti irányzat, az ún. állapot tér elmélet megközelítése és eredményei kézenfekvő megoldásnak tűntek a közúti forgalomirányítási problémák megoldására. Ez a felismerés alapvetően a 1980-as évek végén fogalmazódott meg, ekkor fogalmazták meg állapot térben a közúti folyamatokat és irányítási problémákat. A kutatók közül kiemelkedett Papageorgiou professzor, aki napjainkig tartó kutatói munkájában számos elméleti és gyakorlati eredményt ért el. Azóta több szerző is foglalkozik a közúti forgalomirányítás ezen megközelítésével, azonban ugrásszerű fejlődés illetve gyakorlati alkalmazás a mai napig is ritka. Jelen cikk célja, hogy bemutassa az MTA-SZTAKI Rendszer- és Irányításelméleti Laboratóriumban, valamint a BME Közlekedés-automatikai Tanszékén folyó közlekedésirányítási kutatásban elért eredményeket. A kiindulási pont sok esetben a Papageorgiou által lefektetett modellek, azonban laborunkban olyan új technikákat és módszereket fejlesztettünk ki, melyek sok esetben helyesebbek illetve pontosabbak, mint az eddig kidolgozott eljárások.

KÖZÚTI FOLYAMATOK MODELLEZÉSE ÁLLAPOTTÉR BEN

Állapot tér elmélet

A szabályozás elmélet klasszikus, Bode, Nyquist, Nichols nevéhez kötődő, dominánsan frekvencia tartománybeli analízis és szintézis (tervezési) módszerei az 1960-as évektől kezdődően kiegészültek új, főleg időtartománybeli rendszer- és irányításelméleti módszerekkel. Ezeket a modern irányzatokat a rendszer állapot és állapot tér bevezetése jel-

lemezte, így a hozzájuk illeszkedő tervezési módszereket állapotter módszereknek nevezzük. Egy rendszer állapotának egy t_0 időpontban azt az információt (olyan jelek ismeretét) nevezzük, amelyből az $u(t)$ bemenőjel ismeretében a rendszer válasza minden $t \geq t_0$ időpontra meghatározható. A rendszer válasza itt a jövőbeli $t \geq t_0$ időpontra vonatkozó állapotokat és kimenőjeleket jelenti. A rendszer állapotait leíró jeleket, illetve ezek függvényeit a rendszer állapotváltozóinak nevezzük, melyek egy állapotterből veszik fel értékeiket. Általánosan egy lineáris dinamikus rendszer állapotter reprezentációját a következő alakban írhatjuk fel folytonos illetve diszkrét időben:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Lw \\ y &= Cx + Du + Gv \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + Lw(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) + Gv(k) \end{aligned} \quad (2)$$

ahol: $x \in \mathbf{R}^n$ az állapotvektor, $u \in \mathbf{R}^m$ a bemenőjelek vektora és $y \in \mathbf{R}^p$ a kimenőjelek vektora. Az első egyenlet az ún. állapotdinamikai egyenlet melyben megjelenik a $w \in \mathbf{R}^q$ nulla várható értékű normál eloszlású állapotzaj, a második pedig a megfigyelési (szenzor) egyenlet $v \in \mathbf{R}^p$ mérési zajjal terhelve. Az $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$ mátrix fejezi ki az állapotok közti kapcsolatot, $B \in \mathbf{R}^{n \times m}$, $L \in \mathbf{R}^{n \times q}$ pedig a bemenet illetve zaj hatását. A lineáris rendszerekhez hasonlóan nemlineáris rendszerek állapotter reprezentációja folytonos és diszkrét időben a következő alakot ölti:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, w) \\ y &= h(x, u, v) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x(k+1) &= f(x(k), u(k), w(k)) \\ y(k) &= h(x(k), u(k), v(k)) \end{aligned} \quad (4)$$

ahol f és h nemlineáris vektorváltozós függvényeket jelölnek. Egy rendszer állapotter modelljének meghatározása az állapotváltozók megválasztása után a rendszert leíró mechanikai, elektromos vagy éppen forgalomtechnikai összefüggések szerint történik. (Bokor 1998.) A következőkben bemutatjuk, hogy hogyan lehetséges közúti folyamatok állapotter modelljeinek a megalkotása. A közúti folyamatok időben diszkrét folyamatok, vagyis előre meghatározott időközönként (ciklusidő) kapunk információt a forgalomról, illetve nyílik lehetőség beavatkozni.

Városi kereszteződés forgalmi modellje 1.

Először tekintsünk egy egyszerű négyágú kereszteződést. Jelölje q_i az i -edik ($i=1,2,3,4$) irányból a kereszteződésbe behaladó forgalom nagyságát, hasonlóan y_i az i -edik ágból kihaladó járművek számát. Az ágba beérkező járművek bármely irányba távozhatnak, továbbá a kereszteződésbe behajtó járművek szükségképpen távoznak is. Ezt az összefüggést, vagyis a kereszteződés megmaradási egyenletét, a következő formában írhatjuk fel:

$$\begin{aligned} y_1(k) &= q_1(k)x_{11}(k) + q_2(k)x_{12}(k) + q_3(k)x_{13}(k) + q_4(k)x_{14}(k) \\ y_2(k) &= q_1(k)x_{21}(k) + q_2(k)x_{22}(k) + q_3(k)x_{23}(k) + q_4(k)x_{24}(k) \\ y_3(k) &= q_1(k)x_{31}(k) + q_2(k)x_{32}(k) + q_3(k)x_{33}(k) + q_4(k)x_{34}(k) \\ y_4(k) &= q_1(k)x_{41}(k) + q_2(k)x_{42}(k) + q_3(k)x_{43}(k) + q_4(k)x_{44}(k) \end{aligned} \quad (5)$$

ahol $x_{ij}(k)$ jelöli az i -edik irányból a j -edik irányba haladó járművek arányát, az ún. fordulási rátát. Tömören írva a kereszteződés megfigyelési egyenlete:

$$y_j(k) = \sum_{i=1}^n q_i(k)x_{ij}(k) + v_j(k) \quad (6)$$

ahol v_j egy nulla várható értékű, normál eloszlású mérési zaj. Az ágakba behajtó járműforgalom mérése is zajjal terhelt, vagyis:

$$q_i(k) = q_i^v(k) + \zeta_i(k) \quad (7)$$

ahol ζ_i nulla várható értékű, normál eloszlású mérési zaj. A rendszer tulajdonságait alapvetően a $q_i(k)$ vektor időbeli viselkedése határozza meg. Ha ugyanis a bejövő ágakban mért járműszám állandó, akkor a rendszer lineáris lesz, ha időben változik, úgy nemlineáris modellt kapunk. A kereszteződés állapotegyenletét, azaz a fordulási ráták közötti összefüggést a következő dinamikus egyenletben írhatjuk fel:

$$x_{ij}(k+1) = x_{ij}(k) + w_{ij}(k) \quad (8)$$

ahol w_{ij} az állapotzaj, melyre a már ismertetett hipotézisek igazak. Amint az jól látható, egy egyszerű csomópont forgalmi viszonyait állapotteres megközelítéssel sikerült egy általános struktúrára hozni. A rendszer állapotai a fordulási ráták, kimenetei az ágakban mért járműforgalmak, míg a modellnek nincs bemenete, az ilyen rendszereket autonóm rendszernek hívjuk. (Varga, 2006.) A következőkben megmutatjuk, hogy az állapotváltozók más megválasztása esetén hogyan írhatjuk fel a kereszteződés modelljét.

Városi kereszteződés forgalmi modellje 2.

A mintarendszer legyen tehát ugyanaz, mint az előző pontban: egy jelzőlámpával irányított négyágú kereszteződés. Az állapotváltozóknak azonban most tekintsük az egyes ágakban kialakuló sorok hosszát és ne a fordulási rátákat. A sorok felépüléséről elmondhatjuk, hogy a k -adik lépésben meglévő járműsor csökken a kihaladó járművek számával, viszont növekszik az ágba beérkező járművek számával. Matematikailag megfogalmazva:

$$x(k+1) = x(k) + x_{be}(k) - x_{ki}(k) \quad (9)$$

A behajtó forgalomnagyságot, hasonlóan az előző modellhez, most is mérjük:

$$x_{be}^m(k) = x_{be}(k) + v_q(k) \quad (10)$$

ahol x_{be}^m jelöli a mért behajtó járműszámot, v_q pedig a mérést terhelő nulla várható értékű normál eloszlású zajt. A kihajtó járműszám meghatározása, pedig ideális esetben a zöldidő $u(k)$ hosszával arányos:

$$x_{opt}(k) = q_m u(k) \quad (11)$$

ahol q_m a forgalmi sáv geometriájától és forgalomtechnikájától függő áteresztőképessége. A valóságban azonban a ténylegesen kihaladt járművek száma kisebb mint az optimális:

$$x_{ki}(k) = x_{opt}(k) - x_f(k) \quad (12)$$

ahol x_f a torlódott járművek száma. Az egyenleteket összevetve kaphatjuk a csomópont sorokon alapuló állapot tér modelljét:

$$x(k+1) = x(k) + x_{be}^m(k) - q_m u(k) + x_f(k) - v_q(k) \quad (13)$$

A modell állapotváltozói a felépülő sorok hossza, bemenete az egyes ágakba kivezérelt zöldidő, kimenete pedig a pl. videós érzékelővel mért sorhosszok. Egy négyágú csomópont esetén tehát az állapottér reprezentáció:

$$A = I_4, B = \begin{bmatrix} -q_{m,1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -q_{m,2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -q_{m,3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -q_{m,4} \end{bmatrix}, C = I_4 \quad (14)$$

ahol I_4 a 4×4 -es egységmátrix (Varga, 2006).

Autópálya forgalmi modellje

Az autópályák forgalmi modellezése, szemben a városi kereszteződésekkel, jellemzően makroszkopikus, vagyis aggregált jellemzőkkel dolgozik, makroszkopikus forgalomtechnikai változókkal. Ezek a következők: q forgalomnagyság [j/h], ρ forgalomsűrűség [j/km], v térbeli átlagsebesség [km/h]. Az autópálya főirányához a járművek felhajtókon (r) keresztül is csatlakozhatnak és lehajtókon (s) is kiválhatnak. Mivel az autópályán kialakuló forgalom rendkívül összetett és bonyolult, így matematikai megfogalmazása csak kis, mintegy 500 méteres szakaszonként lehetséges, egy ilyen szakaszt hívunk szegmensnek, az egyenleteket tehát térben diszkrétizálva fogalmazzuk meg. A tényt hogy az i -edik szegmensbe belépő járműveknek ki is kell lépniük a következő, áramlás-tanból is ismert megmaradási egyenletnek a formájában fogalmazzhatjuk meg:

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{n\Delta_i} [q_{i-1}(k) - q_i(k) + r_i(k) - s_i(k)] \quad (15)$$

ahol T a mintavételi idő, n a szegmens forgalmi sávjainak száma, Δ_i pedig az i -edik szegmens hossza. Ezen túlmenően azonban van a forgalomnak egy speciális, más folyamatokra nem jellemző tulajdonsága amit figyelembe kell venni, miszerint a sűrűség növekedésével az áramlási sebesség speciális módon lecsökken. Ezt az alapösszefüggést fejezzük ki az ún. fundamentális diagrammal, mely a következő módon írható (Lighthill and Whitham, 1955):

$$V(\rho) = v_{free} \exp \left[-\frac{1}{a} \left(\frac{\rho}{\rho_{cr}} \right)^a \right] \quad (16)$$

ahol: v_{free} a szabad áramlás sebessége, a modellparaméter, és ρ_{cr} pedig a kritikus forgalomsűrűség. Jól látható, hogy a függvénynek $\rho = \rho_{cr}$ -nál inflexiós pontja van. Homogén áramlás esetén a sebesség és a forgalomnagyság közötti összefüggés:

$$q_i(k) = v_i(k) \cdot \rho_i(k) \cdot n \quad (17)$$

ami azt jelenti, hogy a maximális kapacitást $\rho = \rho_{cr}$ -nál éri el a szakasz. Az egyes szegmens átlagsebességének kialakulását számos további tényező befolyásolja: az előző szegmens sebessége (áramlási tag), a következő szegmens forgalomsűrűsége (várakozási tag), felhajtó járművek száma. Ezen hatások összessége egy nemlineáris egyenletre vezet:

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \frac{T}{\tau} [V(\rho_i(k)) - v_i(k)] + \frac{T}{\Delta_i} v_i(k) [v_{i-1}(k) - v_i(k)] - \frac{vT}{\tau\Delta_i} \frac{\rho_{i+1}(k) - \rho_i(k)}{\rho_i(k) + \kappa} - \frac{\delta T}{\Delta_i} \frac{r_i(k)v_i(k)}{\rho_i(k) + \kappa} \quad (18)$$

Az egyenletben megjelenő κ, τ, v, δ illetve a már ismertett ρ_{cr}, v_{free}, a paraméterek ismeretlenek. Meghatározásukra „offline” optimalizációs eljárást dolgoztunk ki, melyet az M3-as autópályá-

ról gyűjtött valós adatokkal teszteltünk, a vizsgált 4,5 kilométeres szakasz elején, közepén és végén voltak detektorok elhelyezve. Az eljárás során felépítettük a szakasz modelljét 500 méteres szegmensekből, majd egy kezdeti paraméter értékkel szimulációt végeztünk. A szimuláció során a modellnek a szakasz elején és végén mért adatokat olvastuk be és vizsgáltuk a középső ponton mért, illetve a modell által számított értékek különbségét. Ez a különbség az ismeretlen paraméterek értékétől függően változhat, cél tehát azon paraméter érték, melynél a funkcionálnak minimuma van. Az algoritmus a paraméterértékeket módosítva minden lépésben futtatja a szimulációt, képzí a különbséget és elemzi, hogy lehetséges-e további javulás. Az ily módon beállított modell és a valós adatok összehasonlítását mutatja az 1.ábra.

1. ábra

Autópálya modell és valós mérési adatok összehasonlítása

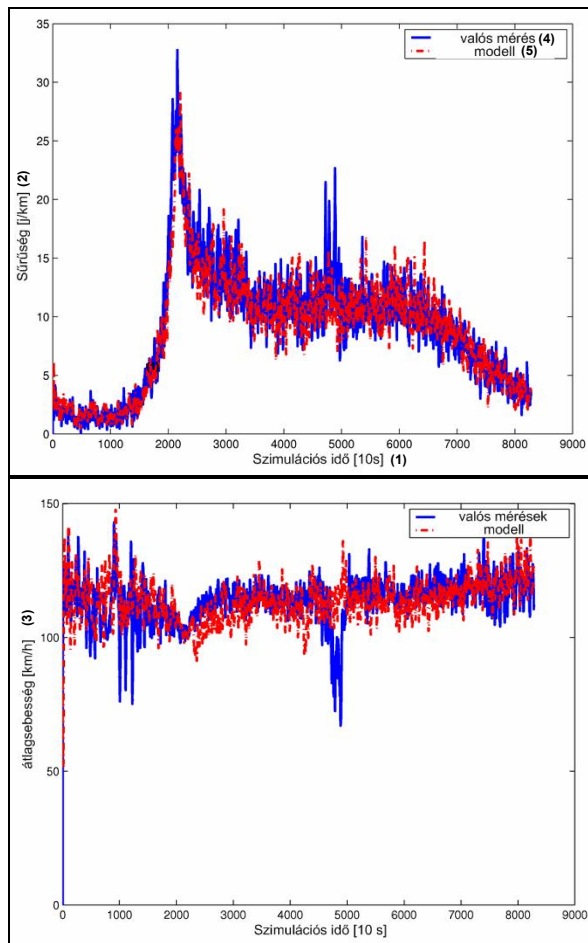


Figure 1: Comparison of freeway model response with detector measurements

Time step [10s](1), Density [veh/km](2), Space-mean speed [km/h](3), Detector measurements(4), Model response(5)

Amint az jól látható, a behangolt modell képes megfelelően reprodukálni a szakasz forgalmi dinamikáját. Ezzel egy kompakt nemlineáris állapotter modellhez jutottunk, melyben az egyes szegmenseket jellemző (ρ_i, q_i, v_i) változókat tekinthetjük az állapotváltozóknak, kimenetnek pedig a mérési pontok adatait. Kérdéses még az u beavatkozó jelek megválasztása, melyre a harmadik pontban adjuk meg a választ (Luspay, 2006).

Több csomópont hálózati modellje

Hálózatok irányításával, a csomópontok összehangolásával nagyobb kapacitást tudunk biztosítani, ennek érdekében vizsgálni kell a csomópontok közti dinamikát. Több egymáshoz közel fekvő csomópont esetén ismét a megmaradási elvből indulhatunk ki, melyet az előzőekkel teljesen analóg matematikai egyenletben fogalmazhatunk meg:

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T[q_z(k) - s_z(k) + d_z(k) - h_z(k)] \quad (19)$$

ahol x_z az útszakaszon található járművek száma, q_z a szakasz bemenő járműszáma, h_z a kimenő járműszám, d_z az útszakasz forrása, s_z az útszakaszból kihaló célforgalom. Az egyes tényezőkről a következőket mondhatjuk:

- $q_z(k) = \sum_{w \in I_M} \alpha_{w,z} h_w(k)$, ahol h_w a w irányból kihaló járműszám, $\alpha_{w,z}$ pedig a már ismertett fordulóráta, melyet vehetünk fixnek vagy változóknak is
- $s_z(k) = \kappa_{z,0} q_z(k)$, ahol $\kappa_{z,0}$ egy fix és ismert célforgalmi tényező
- $h_z(k) = \frac{S_z \sum_{i \in V_z} g_{N,i}(k)}{C}$, ahol S_z az átbocsátó képesség, C a ciklusidő, g pedig a szabadjelzés ideje

Ezek után a megmaradási egyenlet a következő alakot ölti:

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \left[(1 - \kappa_{z,0}) \sum_{w \in I_M} \alpha_{w,z} \frac{S_w \sum_{i \in V_w} \Delta g_{M,i}(k)}{C} - \frac{S_z \sum_{i \in V_z} \Delta g_{N,i}(k)}{C} \right] \quad (20)$$

mely dinamikus állapotegyenlet jól láthatóan a már bemutatott általános állapotegyenlet formájában írható. Az egyenletben szereplő $\Delta g_{M,i} = g - g^n$ ún. centrált beavatkozó jel, a kivezérelt zöldidőnek a nominális zöldidő értékétől való eltérése (Diakaki, 2002).

ÁLLAPOTBECSLÉS

Egy dinamikus rendszert megfigyelhetőnek nevezünk, amennyiben a rendszer állapotter modelljének és a jövőbeli be- illetve kimenetek ismeretében az állapotok meghatározhatóak. Amennyiben egy rendszer megfigyelhető, azonban állapotait nem tudjuk mérni, úgy tervezhetünk rá ún. állapot-megfigyelőt: ha nem ismerjük az $x(t)$ állapotokat akkor olyan $\hat{x}(t)$ állapotokat képzünk mely aszimptotikusan megközelíti az eredeti állapotokat. Sztochasztikus rendszerek állapota becsülhető ún. Kalman-szűrővel, mely az állapotbecslés mellett a rendszerben felmerülő zajok szűrését is lehetővé teszi, az állapothiba kovarianciájának minimalizálásával. A Kalman-szűrő valószínűségelméleti megfogalmazásban az első két statisztikai momentumot használja fel a hiba csökkentésekor:

$$\begin{aligned} E[x(k)] &= \hat{x}(k) \\ E[(x(k) - \hat{x}(k))(x(k) - \hat{x}(k))^T] &= P(k) \end{aligned} \quad (21)$$

A közúti forgalomirányítás területén különösen fontos és hasznos állapotbecslés lehetséges módszereit ismertetjük a következő fejezetben (Welch, 2004).

Célforgalmi mátrix becslése

A már bemutatott városi kereszteződés modellben a fordulási ráták ismeretlenek, azonban ha ismertek lennének, úgy többlet információhoz jutnánk, ami természetesen pontosabb irányítást tenne lehetővé. A probléma megoldása állapotbecsléssel valósítható meg. Az irodalomban található becslési módszerek Kalman-szűrővel dolgoznak, azonban a fordulási ráta értékei nem vehetnek fel bármilyen értéket, rájuk az alábbi egyenlőségi és egyenlőtlenségi feltételek vonatkoznak:

$$0 \leq x_{ij}(k) \leq 1$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij}(k) = 1 \quad (22)$$

Ezeket a korlátozásokat a hagyományos becslési eljárások nem képesek kezelni, az általunk alkalmazott ún. cMHE becslési folyamat során viszont lehetőségünk van korlátozások megadására. A módszer lényege, hogy a feladat során alsó és felső korlátokat fogalmazhatunk meg, mely felhasználásával az állapotbecslés végeredményét már a megadott korlátok teljesülésével kapjuk meg (Rao, 2000). Az eljárás során az előző N darab becslés eredményét is felhasználva kapjuk az eredményt, míg Kalman-szűrő esetén csak az előző becslést tudjuk felhasználni. Az állapotbecslés matematikai megfogalmazás ezek után egy Ψ_k funkcionál minimalizálása, mely a súlyozott állapotzajt és mérési zajt tartalmazza, az előző N lépés becsléseivel, kielégítve a rendszerre előírt dinamikus feltételeket és korlátozásokat. Vagyis:

$$\min_{(\bar{x}_0, \hat{w}_{k-2|k}, \dots, \hat{w}_{k-1|k})} \sum_k \Psi_k \quad (23)$$

Esetünkben a célforgalmi mátrix becslése során felhasznált funkcionál a következő alakban írható fel:

$$\Psi_k = \hat{w}_{k-2|k}^T Q_0^{-1} \hat{w}_{k-2|k} + \hat{w}_{k-1|k}^T Q^{-1} \hat{w}_{k-1|k} + \hat{v}_{k-1|k}^T R^{-1} \hat{v}_{k-1|k} + \hat{v}_{k|k}^T R^{-1} \hat{v}_{k|k} + \Psi_{k-N}^* \quad (24)$$

ahol Q súlymátrix mellett külön súlyoztuk Q_0 -al az N lépéses horizont első elemét. A dinamikai feltételek a következők:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k-1|k} &= \bar{x}_{k-1} + \hat{w}_{k-2|k} \\ \hat{x}_{k|k} &= A\hat{x}_{k-1|k} + G\hat{w}_{k-1|k} \\ y_{k-1} &= C\hat{x}_{k-1|k} + \hat{v}_{k-1|k} \\ y_k &= C\hat{x}_{k|k} + \hat{v}_{k|k} \end{aligned} \quad (25)$$

Továbbá fennállnak a fordulási rátákra felírt állapotkorlátozások is. Az algoritmus tesztelésére 60 perces szimulációt végeztünk, mely eredményei a 2. ábrán láthatóak, összehasonlítva a valós értékekkel. A cMHE eljárást statisztikailag hasonlítottuk össze a Kalman-szűrővel: a becsült állapotváltozók szórásai tizedére csökkentek a cMHE eljárással. A pontosság egyértelműen a fennálló korlátozások betartásának következménye (Kulcsár, 2005).

2. ábra

Fordulási ráták becslése cMHE módszerrel

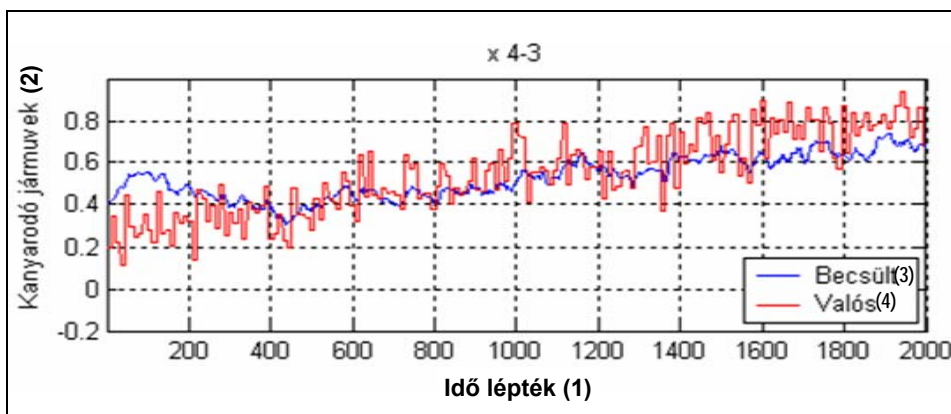


Figure 2: Split rate estimation with cMHE

Time step(1), Turning rates(2), Measurements(3), Estimated(4)

Autópálya állapotbecslő

Az autópályán elhelyezett detektorok, illetve egyéb szenzorok csak telepítésük helyén, lokálisan szolgáltatnak információt a forgalom aktuális lefolyásáról. Az érzékelőket általában 4-5 kilométeres távolságban helyezik el, ezáltal a forgalomról két detektor között közvetlenül nincs információnk. Mint láthattuk a makroszkopikus autópálya modell megfelelően képes szimulálni a valós forgalmi viszonyokat, ezáltal alapjául szolgálhat egy, a nem mért állapotokat becslő, autópálya információkat megsokszorozó algoritmus kifejlesztésére. A munka során nem-lineáris állapotbecslő eljárást, ún. Kiterjesztett Kalman-szűrőt alkalmaztunk. A Kalman-szűrőhöz hasonló elven működő algoritmus annyiban különbözik, hogy a nemlineáris egyenletek aktuális állapotbecslés körüli linearizált modelljével dolgozik (Welch, 2004). A kiterjesztett Kalman-szűrővel végzett állapotbecslési módszert valós adatokkal teszteltük. A már ismertetett mérési elrendezés során az állapotbecslő folyamatosan feldolgozza a szakasz elején és végén mért zajos adatokat, majd a modellegyenletek segítségével a megfelelő algoritmus elvégezte az egyes szegmensek állapotváltozóinak becslését. A középső ellenőrző ponton mért és becsült értékek összehasonlítását mutatja a 3. ábra.

Az autópálya állapotbecslő egy lehetséges alkalmazási célja az ún. Automatikus Esemény Detektáló rendszerek kialakítása. Kutatásunk során kidolgoztunk egy eljárást mely a becsült sebességek gradiensét vizsgálja. Amennyiben éles változást talál a becsült értékek között, úgy a megfelelő kritériumok alapján balesetet riaszt. Ezzel az eljárással gyorsan és 500 méteres pontossággal meghatározhatók az autópályán bekövetkezett balesetek, ezzel emberi életek menthetők meg. Az AED algoritmust sikeresen teszteltük valós adatokkal (Luspay, 2006; Wang, 2005.)

3. ábra

Autópálya sebesség becslése Kiterjesztett Kalman-szűrővel

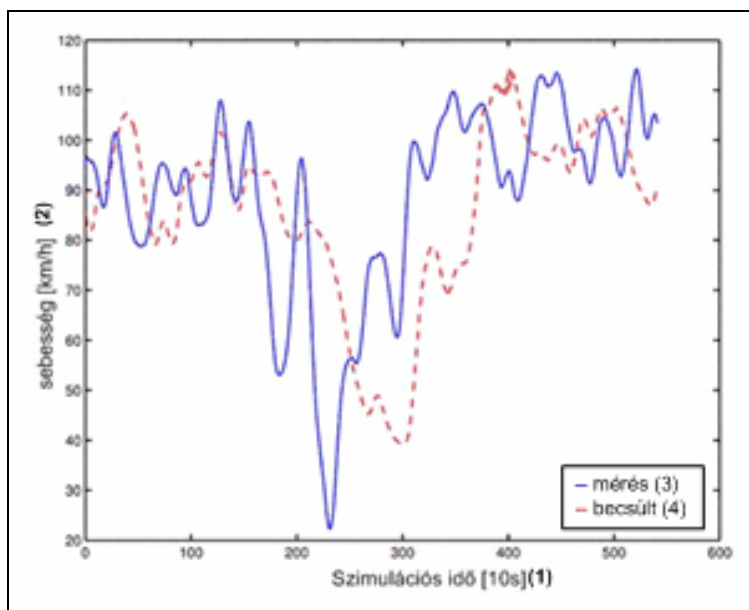


Figure 3: Freeway speed estimation with Extended Kalman Filter

Time step [10s](1), Space-mean speed [km/h](2), Measurements(3), Estimated(4)

OPTIMÁLIS IRÁNYÍTÁSOK ÁLLAPOTTÉRBE

Egy rendszer állapotter modelljét irányíthatónak nevezzük amennyiben megfelelő u bemenőjellel véges $T = t_2 - t_1$ idő alatt a rendszer $x(t_1)$ állapotból tetszőleges $x(t_2) \neq x(t_1)$ állapotba vihető. Az optimális irányítások elve, hogy az adott feladathoz definiálunk egy funkcionált, ún. költségfüggvényt a következő általános alakban:

$$J(x, u) = \frac{1}{2} \int_0^T [x_i^T(t) Q x_i(t) + u_i^T(t) R u_i(t)] dt \quad (26)$$

$$J(k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [x_i^T(k) Q x_i(k) + u_i^T(k) R u_i(k)] \quad (27)$$

Mint látható a költségfüggvény két tagból áll: a Q -val súlyozott rendszer energiából és az R -rel súlyozott input energiából. A feladat megoldása a legegyszerűbb esetben a variációs számításból ismert módszerekkel lehetséges: keressük az $u(t)$ bemenő jelet mely minimalizálja az adott költségfüggvényt az állapotdinamikai egyenletek mellett, ez az ún. LQ szabályozás. A bemenő jelet – lineáris esetben – az állapotok megfelelő lineáris kombinációjaként állíthatjuk elő, ez az ún. állapot-visszacsatolás elve. A következőkben röviden ismertetjük miként lehet az irányítási elveket közúti rendszerek esetén alkalmazni (Bokor, 1998).

Városi kereszteződések összehangolt irányítása

Az irányítórendszer felépítésének meghatározása előtt fontos a szabályozás hatáskörének lehatárolása: a lehatárolt hálózatban nem szükséges minden járműszlopot az optimalizációba bevonni, a költségfüggvényben csak a kiválasztott járműszlopokat kell szerepeltetni. Az állapotok és beavatkozó jelek meghatározása után a valós hálózat topológiája alapján a modell felépítését kell meghatározni, amely általános összefüggéseit már bemutattuk. Amennyiben az irányításba bevont járműszlopok száma n , úgy az A mátrix n dimenziós egységmátrix. A B mátrix i -edik sorának j -edik elemét a következő módon határozhatjuk meg: 0 ha az i -edik járműszlopokra a j -edik jelzőcsoport nem hat, illetve a nem zérus hatás mértéke amennyiben hat rá. A hálózat irányításánál ún. MPC szabályozót terveztünk (Maciejowski, 2002), mely algoritmus a megadott idő horizonton az állapotokat a modell alapján előre meghatározza (predikció), mindezt úgy, hogy a horizont végén az előírt feltételeknek és a költségfüggvénynek is megfelelő állapotok álljanak fenn. A folyamat végén előállt u bemeneti vektor első elemét a szabályozott rendszerre kivezérli, majd a következő lépésben ez ismétlődik ciklikusan. A szabályozási cél teljesülését, a költségfüggvény helyes megválasztásával és megoldásával lehet kielégíteni. A választott költségfüggvényt a sorhosszak minimalizálására írtuk fel, ezután elő kell állítani a horizonton belül az állapotegyenleteket. Ezt a következő módon írhatjuk fel:

$$x_i = \sum_{j=0}^{i-1} A^{i-(j+1)} B u_j + A^i x_0 + i x_{be} \quad i = 1 \dots N \quad (28)$$

mely állapotegyenleteket kifejtve majd a költségfüggvénybe helyettesítve egy kvadratus programozási feladatot kapunk, nevezetesen egy kvadratus funkcionál minimalizálását kell megoldani az előírt feltételek és korlátozások mellett. A beavatkozó jelre ugyanis számos korlátozás áll fenn. A zöldidő vektor minden elemére alsó és felső korlátot írhatunk:

$$t_{MIN} \leq \bar{u}_i \leq t_{MAX} \quad \forall i \quad (29)$$

továbbá u értéke nem lehet nagyobb, mint egy megadott érték, ami a ciklusidő a közben-ső idők és a minimális szabadjelzés különbsége:

$$H\bar{u} \leq t^{MAX} \quad (30)$$

A feltételek mellett végzett optimalizáció eredményeként előáll a horizontra számított beavatkozó jel sorozat. A vektorokból álló sorozatnak vesszük az első elemét, amit megfeleltetünk a szabad jelzésidőnek. Szimulációs eredmények során a Papageorgiou által kialakított LQ alapú TUC 2000 modellel (Diakaki, 2002) hasonlítottunk össze az MPC alapú irányítást. Az eredmények egyértelműen kimutatták az MPC irányítás helyességét, mivel a módszer képes figyelembe venni az előírt korlátozásokat, ebből kifolyólag a legnagyobb kialakult sorhossz mintegy 33%-kal csökkent az LQ alapú szabályozóhoz képest (Varga, 2006).

Autópálya forgalomirányítás

Az autópályák forgalomirányításnak a következőkben két eszközt mutatjuk be, majd a vonatkozó szimulációs eredményeket. Az egyik, legközvetlenebb beavatkozási lehetőség az autópálya felhajtó ágainak szabályozása jelzőlámpával. Az elérendő irányítási cél az autópályán a főirány kapacitásának maximálása és biztonságosabb közlekedés kialakítása. Amint azt említettük a maximális áteresztőképességet a kritikus forgalomsűrűség mellett érhetjük el, tehát a feladatot úgy fogalmazhatjuk meg, hogy amennyiben a kriti-

kus érték alatt van az aktuális forgalomsűrűség, úgy még növelhetjük a felhajtó járművek számát, majd annak elérése után csökkentenünk kell azt. Ezt a megközelítést a leg-egyszerűbb esetben ún. integráló szabályozóval valósíthatjuk meg, mely minden ciklusban a következő egyenlet szerint határozza meg a felhajtó járművek számát:

$$r(k+1) = r(k) - K(\rho(k) - \rho_{cr}) \quad (31)$$

ami jól láthatóan egy állapot-visszacsatolással megvalósított irányítás. A felhajtó járműszámra ily módon felírt összefüggés jól mutatja a megfogalmazott kritérium teljesülését. Nagyobb szakaszok esetén a felhajtók összehangolt irányítására LQ vagy MPC alapú irányítás is alkalmazható.

A másik szabályozási megoldás a dinamikusan változó sebességek kijelzése VMS táblákkal. A módszer alapelve a következő: több (v_{free} , ρ_{cr} , a) paraméterhármassal kisebb v_{free} -hez a kapacitásra vonatkozó összefüggés alapján kisebb áteresztőképesség tartozik. Amennyiben egy szakasz a torlódás közelében, vagy már torlódott állapotban van, úgy előtte kisebb sebességeket kijelvezve kisebb behaladó forgalmat érhetünk el. Ezzel párhuzamosan a torlódott részen nagyobb sebességek kijelzésével növelhetjük a kihaladó forgalmat. A két hatás eredményeként a járműszám az adott szakaszon csökken. Az irodalomban találhatóak empirikus összefüggések arra, hogy miképpen hat a kijelzett sebesség a kialakuló tényleges sebességre. Ezt felhasználva v_{free} -nek megfelelő különböző modellek között kapcsolgatva irányítjuk az autópálya szakaszt. Természetesen, hasonlóan a városi irányítási stratégiákhoz, autópályán is az összehangolt irányítással érhetjük el a legjobb célokat. Szimulációs eredményeket mutat a 4. ábra, melyen jól látható hogy irányítás nélkül a szakasz forgalma leáll, míg a felhajtó és a sebességhatár-irányításával megelőzhető a torlódás.

4. ábra

Autópálya forgalom összehangolt irányítással és irányítás nélkül

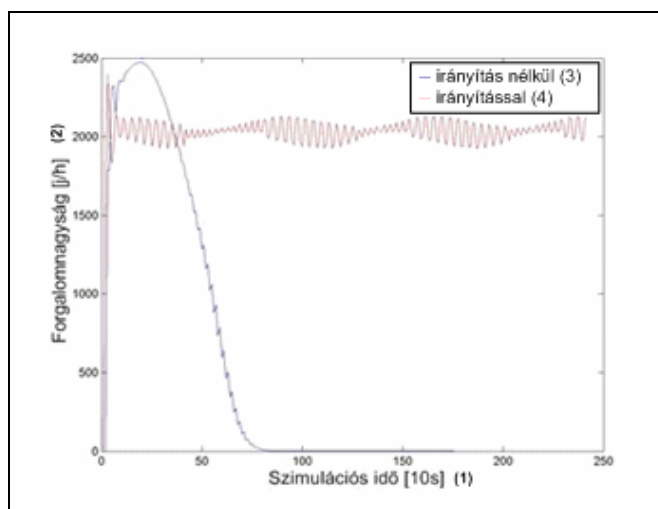


Figure 4: Comparison of freeway flow with traffic control and without traffic control

Time step [10s](1), Traffic flow [veh/h](2), Without control(3), With control(4)

KÖVETKEZTETÉSEK

Amint azt láthattuk a közúti rendszerek állapotterben való modellezése egy olyan szemléletmód, mely forgalomtechnikai szempontból teljesen korrekt azonban lehetővé teszi, hogy a tudományág által elért eredményeket alkalmazzuk közúti forgalomirányításra. A megfigyelő tervezési módszerek alkalmasak a mérési adatok megsokszorozására, majd ezek az adatok felhasználhatóak az irányítás során. Az így kialakított forgalomirányítási kör képes olyan feladatok megoldására, ami hagyományos megközelítéssel lehetetlen. Kutatási céljaink, irányainak a jövőben ezen módszerek további fejlesztése mellett az eredmények gyakorlatban történő megvalósítása.

IRODALOM

- Bokor J., Kurutz K., Kohut M., Gáspár P. (1998). Segédletek az „Irányítástechnika 2” című tárgyhoz. Egyetemi jegyzet BME KAUT : Budapest
- Diakaki C, Papageorgiou M, Aboudolas K. (2002). A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control. *Control Engineering Practice*, Elsevier Ltd., 10, 183-195.
- Kulcsár B., Varga I., Bokor J. (2005). Constrained Split Rate Estimation by Moving Horizon. 16th IFAC World Congress Prague, Czech Republic, Jul. 3-8, 2005, IFAC2005 DVD \Fullpapers\03276.pdf
- Luspay T. (2006). Automatikus Eseménydetektálás Kalman-szűrővel. BME KAUT, Diplomamunka
- Maciejowski J.M.(2002). Predictive Control with Constraints. Prentice Hall
- Lighthill M.J., Whitham G.B. (1955). On kinematic waves, Part I.: Flood movement in long rivers, Part II.: A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of Royal Society*, A229, 281-345.
- Papageorgiou M., Blosseville J.M., Hadj-Salem H. (1990). Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of Boulevard Peripherique in Paris. *Transpn. Res. A*. 24A. 345-370.
- Rao V.C. (2000). Moving Horizon strategies for the constrained Monitoring and Control of Nonlinear Discrete-Time Systems. PhD Thesis U. Of Wisconsin-Madison
- Varga I. (2006). Közúti folyamatok paramétereinek modell alapú becslése és forgalomfüggő irányítás. BMGE Közlekedésmérnöki Kar, Doktori (PhD) értekezés
- Wang Y., Papageorgiou M., Messmer A. (2005). An Adaptive Freeway Traffic State Estimator and Its Real-Data Testing – Part I-II. ITSC’05 Wien, 2005. Sept. 13-16.
- Welch G., Bishop G. (2004). An Introduction to the Kalman Filter.
<http://www.cs.unc.edu>

Levelezési cím (*Corresponding author*):

Luspay Tamás

MTA-SZTAKI, Rendszer- és Irányításelméleti Laboratórium

1111 Budapest, Kende utca 13-17

*Hungarian Academy of Sciences, Computer and Automation Research Institute,
System and Control Laboratory*

H-1111 Budapest, Kende str. 13-17.

Tel: 36-01-279-7266

e-mail: tluspay@sztaki.hu