

Közúti folyamatok paramétereinek modell alapú becslése és forgalomfüggő irányítása

PhD téziszfüzet

Varga István
okl. közlekedésmérnök

Témavezető:
Prof. Dr. Bokor József
tanszékvezető egyetemi tanár

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki Kar
2006

1 A kutatás motivációja, módszere

A közlekedéstudomány számára az egyik legnagyobb kihívás a zsúfolt környezetünkben létesített közlekedési rendszerek tervezése és működtetése. Különösen igaz ez a közúti alágazatban, azon belül pedig a városi közlekedési hálózatokban. A növekvő igények kiszolgálása érdekében az esetek többségében nem lehetséges a pályakapacitások további bővítése, hanem a meglévő hálózat jobb kihasználtságát kell elérni. Ehhez nélkülözhetetlen a közlekedési folyamatok hatékonyabb szabályozása, amiben a korszerű közúti közlekedésirányítás kínálhat új lehetőségeket. A szabályozási problémák megoldásában segít a más diszciplínák által kidolgozott elméleti eredmények integrálása és az irányítást végző technikai berendezések műszaki színvonalának emelkedése is.

Az általam végzett tudományos munka célja az volt, hogy feltárja a közúti közlekedésben meglévő irányítási problémák egy részét és azokra a modern irányítás-elmélet segítségével adjon megoldásokat. A motiváció abból a felismerésből származik, hogy a közúti közlekedés sajátosságai miatt elsősorban csak a korszerű, robusztus irányítási algoritmusok szolgálhatnak megfelelő minőségi megoldásokkal.

A közúti közlekedés egyik sajátossága, hogy jellemzően olyan folyamatokat kell irányítani, amelyekről sokszor nem állnak rendelkezésünkre teljes körű mérési adatok. Az ilyen jellegű rendszerek szabályozása csak a rendszer belső állapotának becslése révén és robusztus irányítások tervezésével lehetséges, ahol a különböző zavarásokat, modellezési hibákat és bizonytalanságokat is figyelembe tudjuk venni.

Kutatásaim során egy másik általános megállapításra is jutottam. A közúti közlekedés irányításában alapvető problémát jelentenek a közúti folyamatokra és a beavatkozó jelekre fennálló erős korlátok. Ezen egyenlőségi és egyenlőtlenségi feltételek kezelésére olyan módszereket kellett választanom, amelyek lehetővé teszik a közúti folyamatok állapotainak korlátozások mellett végzett becslését, valamint irányítását.

A kutatómunkám során megoldott feladat jelentősége elsősorban az előbb említett korlátozások figyelembevételével végzett állapotbecslés és irányítás közlekedési irányítórendszerekre történő kidolgozásában van. Ezekkel a technikákkal sikerült - szimulációban - minőségi javulást kimutatni a jelenleg használt, más állapotér alapú becslő és irányító algoritmusokhoz képest.

2 A kutatómunka előzményei és célkitűzése

Napjainkban a mérnöki tudományok világszerte jelentős változásokon mennek keresztül, melynek során nagy léptékben növekszik az informatikai eszközök alkalmazása. Az egyik kiemelkedő és gyorsan fejlődő szakterület a jelek és rendszerek elmélete, a rendszerelemzés és, ehhez kapcsolódóan, az irányítástechnika. A szabályozó rendszerek tervezése során a klasszikus frekvencia tartománybeli analízis és szintézis módszerei (Bode, Nichols, Nyquist) az 1960-as évektől kiegészültek az időtartománybeli rendszer- és irányításelméleti módszerekkel. Ezeket a modern irányzatokat a *rendszerállapot* és az *állapottér* bevezetése jellemezte, így a hozzájuk illeszkedő tervezési módszereket állapotter módszereknek nevezték el. A korszak egyik legjelesebb képviselője a magyar származású Kálmán Rudolf, akinek a 60-as években megjelent cikkei [11],[12] számos alapvető koncepció kidolgozását és probléma megoldását jelentették. Az állapotter elmélet a mai (posztmodern) rendszer és irányításelmélet, valamint a korszerű irányítási rendszerek tervezésének is egyik alapvető eleme.

A közúti közlekedési folyamatok állapotterben történő leképezésére 30 évvel ezelőtt indultak meg próbálkozások. A közúti folyamatok állapotbecslésének alap gondolata először Nahi és Trivedi munkájában fogalmazódott meg [20]. A 80-as években Cremer és Keller [5],[6], valamint Nihan és Davis [21],[22] egyszerű kereszteződésben becsülték a célforgalmi folyamatokat. Az állapotbecslés mellett egyre nagyobb szerepet kapott a dinamikus állapot-visszacsatoláson alapuló szabályozások tervezése közúti rendszerekben [23]. Az egyik legnagyobb projekt keretében Papageorgiu és munkatársai a Párizs melletti körgyűrűn állították üzembe az ALINEA [24] szabályozást, majd megjelentek a főként az optimális LQ szabályozásra építő megoldások [25]. Magyarországon a közúti irányításban az ilyen megközelítés nem honosodott meg. Az általános jelzőlámpa irányítások területén többek között Gilicze, Fí és Maklári hozott új eredményeket.

2.1 Célforgalmi mátrix feltételek mellett végzett becslése mozgó horizonton

A közlekedési áramlat egyik jellemző paramétere az az információ, hogy egy közlekedési rendszerben a járművek honnan hová tartanak. Egy jármű által választott behaladó és kihaladó irány között a kapcsolatot a honnan-hová információ teremti meg, amit mátrixba szervezhetünk [5],[6]. A magyar terminológiában célforgalmi mátrixnak nevezett struktúrát értelmezhetjük egy egész városi hálózatra, vagy csak egy egyszerű csomópontra is. A közúti folyamatok paraméterei és így a célforgalmi adatok sem mindig mérhetőek automatikus berendezésekkel, azonban képesek vagyunk ezeket becsülni állapot-megfigyelő alkalmazásával [4],[31],[32]. A Kálmán-szűrő használata ezen a területen megfelelő, de nem mindig ad pontos

értéket a folyamatokra jellemző korlátok miatt. Ez a felismerés vezetett oda, hogy a célforgalmi mátrix becslésére valamilyen, a korlátozások figyelembevételére is alkalmas állapot-megfigyelőt célszerű használni. A rendelkezésre álló technikák közül a korlátozások mellett végzett Mozgó Ablakos Becslés (cMHE) [2],[26],[27] alkalmazása tűnt a legígéretesebbnek.

2.2 Egyedi kereszteződés jelzőlámpa szabályozása torlódásdetektáló szűrővel

Az egyedi kereszteződések jelzőlámpás szabályozásának elsődleges célja a csomópont elsőbbségi viszonyainak meghatározása, valamint a biztonságos járműát-haladás biztosítása úgy, hogy a forgalom lefolyása a lehető leghatékonyabb legyen. A hatékonyságot a teljes áthaladási idő, a sorban álló járművek száma, a megállások száma, a környezeti terhelés és még más minőségi mérőszámok alapján is értékelhetjük. A zsúfolt környezetben működő irányítórendszer egyik legnagyobb problémája, hogy az irányítás hatása nem mindig érvényesül, mert a túlteltett forgalomban torlódások akadályozzák a járműmozgást. Ezt nehezítheti, hogy a csomóponti forgalomirányító berendezések általában csak egy tervezési célfüggvény kielégítésére alkalmasak, így felmerül az igény egy átkonfiguráló struktúra tervezésére.

Kutatómunkám célja egy olyan szabályozó struktúra kidolgozása volt, amelyben a torlódási információ birtokában, lehetőség van az éppen aktuálisan kiválasztott célfüggvény kielégítése érdekében, a soron következő ciklus fázistervét módosítani. A torlódási információ előállításához egy hibadetektáló szűrő alkalmazására van lehetőség, amely a kihaladni nem képes járművek számának várható értékét tudja meghatározni. A hibadetektáló szűrők vizsgálata során megállapítottam, hogy a megvizsgált lehetőségek közül a geometriai megközelítésű FPRG szűrőtípus [15],[19] tűnik a legalkalmasabbnak a feladatra.

2.3 Több csomópontból álló hálózat forgalomirányítása modell prediktív szabályozással

Abban az esetben, amikor több jelzőlámpás kereszteződés között viszonylag kevés a távolság, akkor célszerű a forgalomirányító berendezések működését összehangolni [13],[17]. A közúti járművek forgalma mellett ez vonatkozhat a tömegközlekedési eszközökre és a gyalogosforgalomra is. Az összehangolás különösen nagy hangsúlyt kap olyan helyeken, ahol több kereszteződés van egymáshoz közel kisebb vagy nagyobb hálózatban, elsősorban a városokban.

Kutatómunkám során olyan szabályozási eljárás kidolgozását tűztem ki célul több csomópontból álló hálózatokra, amely a hatáskörébe vont valamennyi kereszteződés jelzőlámpáinak szabályozását összehangoltan, forgalomtól függően végzi el. A

szabályozónak képesnek kell lennie arra, hogy dinamikusan alakítsa ki a kereszteződések fázisterveit. A megoldáshoz olyan módszert kell választani, amelyben a beavatkozó jel képzése során lehetőség van figyelembe venni valamennyi korlátozó feltételt. Erre a Modell Prediktív Szabályozón (MPC) [10],[18] alapuló eljárás kínál lehetőséget, amelyben elérendő cél lehet a helyzetjelző vonalaknál sorban álló járművek számának minimalizálása.

2.4 Közúti folyamatok leírása pozitív rendszerként

A pozitív tulajdonságok az ember környezetében számos területen kapnak különös jelentőséget [8]. Nagyszámú példát találunk arra, hogy a legtöbb olyan változó, amely valamilyen anyag vagy energiamennyiséget képvisel, pozitív értékű. A pozitív rendszerek első definícióját Luenberger [16] adta meg: *A pozitív rendszer egy olyan rendszer, amelyben az állapotváltozók mindig pozitívak, vagy legfeljebb nem negatívak.*

A közúti közlekedés paraméterei és állapotváltozói szintén olyan fizikai jellemzők, amelyeknek csak pozitív elemeik lehetnek (pl.: járműszám, forgalom nagyság, járműsűrűség). A vizsgált közúti közlekedési folyamatok többségében az állapotok az eredeti fizikai jelentésük alapján pozitívak, sőt általában még a beavatkozó jel is az. Az ilyen rendszereket *természetesen pozitív* rendszereknek neveztem el.

Kutatómunkám során világossá vált, hogy a pozitív lineáris rendszerek modellezési és irányítási problémái [1],[28],[29],[30] miatt a gyakorlati feladatok megoldására az általános lineáris rendszerként felírt, de csak a pozitív ortánszon belül irányított modelleket érdemes vizsgálnom.

2.5 Az alkalmazott modellek verifikációja

A szabályozótervezés céljából felépített modellek készítése során törekedni kell a minimális reprezentáció elérésére. Az ilyen modellek egyszerűsítettek, azaz nem alkalmasak a valós folyamatok pontos szimulációjára, de kiválóan megfelelnek a modell alapú állapotbecslők és irányítórendszerek tervezéséhez, különösen, ha sikerül a folyamatokat lineáris modellosztályokkal leírni. A modell egyszerűsítéséből származó állapothibákat a korszerű robusztus szabályozások alkalmazásával tudjuk kezelni.

A dolgozatomban használt modellek a „Store and forward” alaptípushoz tartoznak, azon belül is leginkább a bemutatott TUC modellre hasonlítanak. A TUC modell helyességét számos publikáció és három nagyvárosban kiépített dinamikus irányítórendszer által szolgáltatott kedvező tapasztalatok bizonyítják: Chania, Görögország, 23 db kereszteződés; Southampton, Nagy-Britannia, 53 db kereszteződés; München, Németország, 25 db kereszteződés [14].

3 Új tudományos eredmények

1. Tézis. *Módszert dolgoztam ki a közúti közlekedési folyamatok állapotváltozóinak és paramétereinek korlátozások mellett végzett, modell alapú becslésére, amelyet közlekedési rendszer célforgalmi mátrixának becslésén keresztül mutattam be, ahol a célforgalmi mátrix elemeit tekintettem állapotváltozóknak.*

- Megvizsgáltam a közúti folyamatok nehezen, vagy egyáltalán nem mérhető forgalmi paramétereinek becslésére használt jelenlegi módszereket. Ráműtattam a Kálmán-szűrő alkalmazására építő megoldások hiányosságára. A Kálmán-szűrő által becsült várható érték nem minden esetben megfelelő a folyamatok állapotaira fennálló korlátozó feltételek miatt. Bizonyítottam, hogy a célforgalmi mátrix becslése korlátozások mellett is elvégezhető a cMHE technika alkalmazásával, csökkentve ezzel a becslési hibát (sztochasztikus rendszerek esetén annak várható értékét).
- A fordulási ráták modellezése céljából a diszkrét idejű lineáris időinvariáns sztochasztikus állapotter modellt az alábbi módon írtam fel:

$$x_{ij}(k+1) = x_{ij}(k) + w_{ij}(k) \quad (3.1)$$

ahol $w_{ij}(k)$ az állapotzaj, $x_{ij}(k)$ pedig a fordulási ráta, ami azt írja le, hogy az adott i irányból behaladó járművek mekkora hányada (%) fordult el és haladt ki a j irányba, $k=1,2,\dots,N$. A rendszerben mérjük a bemenő és a kimenő járművek számát, a kimeneti mérés zajjal terhelt, a mérési (kimeneti) egyenlet az alábbi alakú:

$$y_j(k) = \sum_{i=1}^n q_i(k)x_{ij}(k) + v_j(k) \quad (3.2)$$

ahol $q_i(k)$ az adott i irányból a kereszteződésbe behaladó forgalom nagysága, $y_j(k)$ az adott j irányba a kereszteződésből kihaladó forgalom nagysága, $i = 1,\dots,n$ és $j = 1,\dots,m$, $v_j(k)$ egy nem definiált eloszlású zaj. A bemeneti járműáramlás is mérési zajjal terhelt, ahol $\zeta_i(k)$ a nulla várható értékű normál eloszlású zaj.

- Megmutattam, hogy a rendszer állapotai becsülhetők az alábbi korlátozások figyelembe vételével is:

$$\begin{aligned} 0 \leq x_{ij}(k) \leq 1 \\ \sum_{j=1}^m x_{ij}(k) = 1 \end{aligned} \quad (3.3)$$

- A feltételek mellett végzett állapot-megfigyelő tervezésére a korlátozások mellett végzett Mozgó Ablakos Becslési (MHE) technikát javasoltam, amely az állapotok várható értékét becsüli meg úgy, hogy következőkben

felírt Ψ_k funkcionált minimalizálja és kielégíti a dinamikai egyenletet (3.1), valamint a (3.2) mérési egyenletet:

$$\min_{(\bar{x}_{k-N-1}, \hat{w}_{k-N-1|k}, \dots, \hat{w}_{k-1|k})} \Psi_k \quad (3.4)$$

$$\Psi_k = \hat{w}_{k-N-1|k}^T Q_0^{-1} \hat{w}_{k-N-1|k} + \sum_{j=k-N}^{k-1} \hat{w}_{j|k}^T Q^{-1} \hat{w}_{j|k} + \sum_{j=k-N}^k \hat{v}_{j|k}^T R^{-1} \hat{v}_{j|k} + \Psi_{k-N}^*$$

A dinamikai feltételek (j a horizont futó indexe):

$$\hat{x}_{j+1|k} = A\hat{x}_{j|k} + G\hat{w}_{j|k} \quad j = k - N - 1, \dots, k - 1 \quad (3.5)$$

$$y_j = C\hat{x}_{j|k} + \hat{v}_{j|k} \quad j = k - N - 1, \dots, k \quad (3.6)$$

A kezdeti érték a horizont elején:

$$\hat{x}_{k-N|k} = \bar{x}_{k-N} + \hat{w}_{k-N-1|k} \quad (3.7)$$

A tézis az értekezés 3. fejezetén valamint a következő publikációkon alapul:

[V-1],[V-5],[V-6],[V-9],[V-10],[V-11].

2. Tézis. *Módszert dolgoztam ki egyedi kereszteződés jelzőlámpás szabályozására, ahol hibadetektáló szűrő alkalmazásával becsültem meg a torlódott járművek számát. A torlódási információt felhasználtam a jelzőlámpák irányítását végző át-konfiguráló szabályozóstruktúrában, amelynek alapját egy LQ optimális algoritmus alkotja.*

- Megvizsgáltam az egyedi kereszteződések jelzőlámpás szabályozásának meglévő módszereit, majd javaslatot tettem a csomóponti mozgások állapot-térben felírt dinamikai leírására az alábbi diszkrét idejű, lineáris időinvariáns (LTI) sztochasztikus állapotter modellel:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + x_{be}(k) + v_q(k) + x_f(k) \quad (3.8)$$

A mérési (kimeneti) egyenlet:

$$y(k) = Cx(k) + v_y(k) \quad (3.9)$$

ahol $x(k)$ vektor az állapotot, azaz csomópont behajtó ágaiban a helyzetjelző vonal előtt sorban álló járművek számát jelöli. A beavatkozó jel a zöld idő $u(k)$. A B mátrix elemei jelölik az átbocsátó képesség mérőszámait. A rendszerben mérjük a sorhoz érkező $x_{be}(k)$ bejövő járműmennyiséget, és az $x(k)$ sorhosszakat. A v_q és a v_y változók mérési zajok.

- Bemutattam, hogy az így felépített (3.8) modellben lehetőség van az egyes ágakból kihaladni nem képes járművek $x_f(k)$ számának detektálására, ami a (3.10) állapotegyenlet reziduál információjának kiszámítását jelenti. A torlódási információ (reziduál) meghatározására egy FPRG hibadetektáló szűrőt terveztem. A szűrőt, amely egy nem teljes rendű állapot-megfigyelő, torlódásdetektáló szűrőnek neveztem el. Felírása diszkrét LTI esetre az alábbi módon történt:

$$\begin{aligned} z(k+1) &= Fz(k) - Ey(k) + \bar{D}u(k) \\ r(k) &= Mz(k) - Hy(k) \end{aligned} \quad (3.10)$$

ahol r a reziduál értéke, (amely az x_f várható értéke), z a szűrő állapota, az F, E, D, M, H paramétermátrixok pedig a rendszer folytonos idejű FPRG hibadetektáló szűrő mátrixainak diszkrét idejű megfelelői.

- A torlódásdetektáló szűrővel meghatározható a behajtó ágakban fellépett torlódás mértéke, amit a későbbiekben felhasználtam a jelzőlámpa szabályozásban. Átkonfiguráló, optimális szabályozó struktúrát dolgoztam ki, amely a fázis időtervet minden ciklus elején újragenerálja. A szabályozó algoritmus alapja egy LQ optimális szabályozó, amely a becsült torlódás alapján képes az irányítás átkonfigurálására.

A tézis az értekezés 4. fejezetén valamint a következő publikációkon alapul:

[V-7],[V-13],[V-14],[V-31].

3. Tézis. *Módszert dolgoztam ki a több csomópontból álló jelzőlámpa hálózatok szabályozására. Bemutattam, hogy Modell Prediktív Szabályozó alkalmazásával a rendszerben meglévő természetes korlátok mellett is lehetőség van valamennyi jelzőlámpa fázisidő tervének ciklusonkénti, dinamikus meghatározására.*

- Megvizsgáltam a több csomópontból álló jelzőlámpa hálózatok forgalom-szabályozásának jelenleg használt módszereit, majd javaslatot tettem a járműmozgások állapot térben történő felírására, amelyet a szakirodalomból ismert TUC [7] modellre alapoztam. Javasoltam a több csomópontból álló jelzőlámpa hálózatokban végbemenő jármű mozgások állapot térben történő leírását az alábbi diszkrét idejű LTI sztochasztikus állapotegyenlettel:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + x_{be}(k) + w(k) \quad (3.11)$$

ahol x a sorban álló járművek száma, u a beavatkozó jel (a szabad jelzés-idő), x_{be} a lehatárolt rendszer határain belépő járművek száma (amelyet a mérhető hibaként vettem fel), w a nem mérhető hibák összessége. A nem

mérhető hibák között szerepelnek a mérésekre rakódó zajok és az állapot-
ba. A mérések v nulla várható értékű, normál eloszlású zajjal terheltek:

$$y(k) = Cx(k) + v(k) \quad (3.12)$$

- Megfogalmaztam a B mátrix felépítésének módszerét több kereszteződésből álló hálózatban, valamint bemutattam, hogy lehetőség van a beavatkozó jelekre fennálló következő feltételek kielégítésére is:

$$u_i \geq t_{MIN} \quad \forall i \quad (3.13)$$

$$u_i \leq t_{MAX} \quad \forall i \quad (3.14)$$

$$\sum_{i=1}^{O_j} u_i \leq t_j^{MAX} \quad j = 1 \dots J \quad (3.15)$$

ahol O_j a j -ik kereszteződéshez tartozó irányított járműoszlopok száma, J az irányított kereszteződések száma.

- Módszert dolgoztam ki MPC szabályozó tervezésére, amely a hálózatban sorban álló járművek számát minimalizálja. A bemutatott szabályozó minden jelzőlámpa ciklusban úgy állapítja meg a beavatkozó jelet, hogy a következő funkcionált minimalizálja, miközben kielégíti a (3.11) dinamikai és a (3.12) mérési egyenleteket és a (3.13), (3.14) és a (3.15) korlátozó feltételeket is:

$$J(k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_p} (x_i^T(k) Q x_i(k) + u_i^T(k) R u_i(k)) \quad (3.16)$$

ahol N_p a predikciós horizont hossza, $x_i(k)$ a helyzetjelző vonalak előtt sorban álló járművek száma, $u_i(k)$ a szabad jelzés idők hossza.

A tézis az értekezés 5. fejezetén valamint a következő publikációkon alapul:

[V-2],[V-3],[V-4].

4. Tézis. *Módszert dolgoztam ki, amelyben a közúti folyamatokat általános (nem pozitív) rendszerként modelleztem, a pozitív tulajdonság figyelembe vételét pedig a visszacsatolt rendszerben a szabályozótervezés során biztosítottam a megfelelően felállított korlátozások beépítésével. Javaslatot tettem a lineáris rendszerként modellezett közlekedési folyamatok pozitív ortánszon belüli irányítását lehetővé tevő szabályozó tervezési feltételeinek meghatározására.*

- Rámutattam, hogy az általam vizsgált közúti folyamatok többsége természetesen pozitív értékészletű rendszer, azaz az állapotok az eredeti fizikai jelentésük alapján pozitívak, sőt még a beavatkozó jel is az. A pozitív tulaj-

donságból következik, hogy szóba jöhető állapotér modellek fizikailag értelmes megoldásai (trajektóriái) csak nemnegatív koordinátákat tartalmazhatnak. A szabályozási feladatot nehezíti, hogy a beavatkozó jelekre még korlátossági feltételek is fennállnak.

- Bemutattam, hogy a pozitív lineáris rendszerek modellezési és irányítási problémái miatt a gyakorlati feladatok megoldására az általános lineáris rendszerként felírt, de csak a pozitív ortánszon belül irányított modellosztályt tartom a legígéretesebbnek.
- Javaslatot tettem a szabályozótervezéshez szükséges módszerek és korlátozó technikák alkalmazására, amelyekben lehetőség van az állapotokra és a beavatkozó jelekre fennálló pozitív tulajdonságok figyelembe vételére. A Modell Prediktív Szabályozó algoritmus használata esetén javaslatot tettem a predikciós horizont méretének a megválasztására.

A tézis az értekezés 6. fejezetén valamint a következő publikációkon alapul:

[V-2],[V-30].

4 Továbbfejlesztési lehetőségek és gyakorlati alkalmazhatóság

A bemutatott eredmények átolvasása után kézzelfoghatónak tűnik, hogy a továbbfejlesztés elsődleges iránya az eredmények integrálásában rejlik. Az összehangolt, több csomópontból álló hálózatok szabályozása esetén láthattuk, hogy a módszer egyik alap paramétere a csomópontokban lévő fordulási ráták értéke, amelyet ott konstansnak feltételeztem. A szabályozási feladat azonban nagyban függ a fordulási ráták értékétől, így igazán pontos eredményt az első tézisemben bemutatott becslés eredményeiből kaphatnánk. Az első és a harmadik tézis összekapcsolásán túl a második tézisben bemutatott torlódásdetektáló szűrő integrálása további javulást hozhat. Egy másik lehetőség a szabályozások javítására, ha a költségfüggvényben a járműoszlopok hossza helyett a teljes utazási időt vesszük figyelembe. Ennek az új változónak használatához azonban teljesen át kell alakítani a felállított hálózati modellt is, ami ezzel bizonyosan nemlineáris válik.

A bemutatott módszerek gyakorlati felhasználására abban az esetben nyílik lehetőség, ha a forgalomirányító berendezés alkalmas az összetettebb programozási feladatok elvégzésére. Az utóbbi időben végbement gyors fejlődés eredményeképpen a legújabb típusok esetében ezt már meg lehet oldani, így a módszerek valós körülmények közötti kipróbálásra hamarosan sor kerülhet. Különösen kivitelezhetőnek látom a célforgalmi mátrix becslésének módszerét, amely elsősorban a körforgalmak esetében adhat hasznos eredményt.

5 Felhasznált irodalom

- [1] Bacciotti, A.: On the positive orthant controllability of two-dimensional bilinear systems, *Sys. Control Lett.*, 3: 53-55, 1983
- [2] Bemporad, A., Mignone, D., Morari, M.: "Moving Horizon Estimation for Hybrid Systems and Fault Detection" ACC San Diego, California, 1999
- [3] Bokor J.: LQ control. BME KAUT doktori képzés segédlet. 2006
- [4] Cremer, M., Keller, H.: "Dynamic Identification of Flows from Traffic Counts at Complex Intersections" Proc. 8th Int. Symposium on Transportation and Traffic Theory, University of Toronto Press, Toronto Canada, 1981, pp 199-209.
- [5] Cremer, M., Keller, H.: "Systems Dynamics Approach to the Estimation of Entry and Exit O-D Flows" Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory, VNU, Utrecht, The Netherlands, 1984, pp. 431-450.
- [6] Cremer, M., Keller, H.: "A New Class of Dynamic Methods for the Identification of Origin-Destination Flows" Transportation Research-B, 1987, Vol. 21B, No. 2, pp. 117-132.
- [7] Diakaki, C, Dinopoulou, V., Aboudolas, K., Papageorgiou, M., Ben-Shabat, E., Seider E., and Leibov, A.: Extensions and new applications of the Traffic Control Strategy TUC. TRB 2003 Annual Meeting.
- [8] Farina, L., Rinaldi, S.: Positive linear systems: Theory and applications. New York: Wiley, 2000.
- [9] Hangos, K., Bokor, J., Szederkényi, G.: Computer controlled systems. Veszprémi Egyetemi Kiadó. 2002. ISBN 963 9220 94 9
- [10] Hegyi, A.: Model Predictive Control for Integrating Traffic Control Measures. PhD Thesis Technische Universiteit Delft, 2004
- [11] Kalman, R.E.: "A New Approach to Linear Filtering and Prediction" Journal of Basic Engineering (ASME), 1960, 82D, pp. 35-45.
- [12] Kalman, R.E., Ho, Y.C., Narendra, K.S.: Controllability of Dynamic Systems, Contribution to Differential Equations, Vol. 1. Pp. 189-213.
- [13] Kövesné dr. Gilicze Éva: Összehangolt, időterv szerint működő jelzőlámpás kereszteződések forgalmi folyamatai. Kandidátusi értekezés, MTA 1977
- [14] Kosmatopoulos, E., Morris, R., Bielefeldt, C., Richards, A., Mueck, J., Weichenmeier, F., Papageorgiou, M.: Field evaluation of the signal control strategy TUC at three urban traffic networks. Pprints 4th IFAC Workshop,

Bansko, Bulgaria, 3-5 October 2004, pp. 67-73.

- [15] Kulcsár, B.: Design of robust detection filter and fault correction controller. PhD doktori értekezés. 2005
- [16] Luenberger, D.: Introduction to Dynamics Systems, Wiley, New York, 1979
- [17] Nagy Ervin – Szabó Dezső (szerk.): Városi közlekedési kézikönyv – Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984
- [18] Maciejowski, J. M.: Predictive Control with Constraints. Prentice Hall. 2002
- [19] Massoumnia, M. A.: A geometric approach to the synthesis of failure detection filters. IEEE Transactions on Automatic Control, AC-31(9):839–846, 1986
- [20] Nahi, N., Trivedi, A.: Recursive Estimation of Traffic Variables: Section Density and Average Speed, Transportation Science, Vol 7, pp 269-286., 1973
- [21] Nihan, N.L. and Davis, G.A.: "Recursive Estimation of Origin-Destination Matrices from Input/Output Counts" Transportation Research B, 1987, Vol. 21B, No. 2, pp. 149-163.
- [22] Nihan, N.L. and Davis, G.A.: "Application of Prediction-Error Minimization and Maximum Likelihood to Estimate Intersection O-D Matrices from Traffic Counts" Transportation Science, 1989, Vol 23, No 2.
- [23] Papageorgiou, M.: „Applications of Automatic control concepts to Traffic Flow Modeling and Control” Lecture Notes in Control and Information Sciences 50. Springer-Verlag, 1983
- [24] Papageorgiou, M., Haj-Salem, H., & Blosseville, J.: ALINEA: a local feedback control law for ramp metering. Transportation Research Record, 1320, pp. 58-64., 1991
- [25] Papageorgiou, M. "Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems" Pergamon Press, 1991
- [26] Rao, V. C. "Moving Horizon strategies for the constrained Monitoring and Control of Nonlinear Discrete-Time Systems" PhD Thesis U. of Wisconsin-Madison, 2000
- [27] Rao, V. C., Rawlings, J. B., Mayne, D. Q.: "Constrained State Estimation for Nonlinear Discrete-Time Systems: Stability and Moving Horizon Approximations" IEEE Transaction on Automatic Control, 2003, Vol 48. pp. 246-258.
- [28] Sachkov, Y. L.: Controllability of bilinear systems with a scalar control in the positive orthant, (in Russian) Mat. Zametki 58 (1995), no. 3, 419-424;

- translation in Math. Notes 58 (1995), no. 3-4, 966-969 (1996).
- [29] Sachkov, Y. L.: On positive orthant controllability of bilinear systems in small codimensions, SIAM J. Control Opt., 35: 29-35, 1997
 - [30] Valcher, M.E.: Controllability and reachability criteria for discrete-time positive systems, International Journal of Control 65(3) (1996) 511-536.
 - [31] Zijpp, N.J. van der: "Dynamic origin-destination matrix estimation from traffic counts and automated vehicle identification data" Transportation Research Record No. 1607. TRB, Washington, DC, 1997, pp. 87-94.
 - [32] Zijpp, N.J. van der: "Comparison of methods for dynamic origin-destination matrix estimation" IFAC Transportation Systems Symposium, Chania, Greece, 1997, pp. 1445-1450.

6 Saját publikációk jegyzéke

6.1 Az értekezéshez kapcsolódó publikációk

6.1.1 Idegen nyelvű folyóirat

- [V-1] Kulcsár, B., Bécsi, T., Varga, I.: Estimation of dynamic origin destination matrix of traffic systems, Periodica Polytechnica ser. Transp. Eng., Budapest, Hungary, 2004, Vol. 33. No 1-2. pp. 3-14.
- [V-2] Varga, I., Bokor, J.: New Approach in Urban Traffic Control Systems, Periodica Polytechnica ser. Transp. Eng., Budapest, Hungary, (accepted)
- [V-3] Péni, T, Varga, I., Szederkényi, G. and Bokor, J.: Robust model predictive control with state estimation for the pressurizer system of the Paks nuclear power plant. Hungarian Journal of Industrial Chemistry Veszprém, 2005, Vol. 33(1-2) pp. 89-96.
- [V-4] Varga, I., Kulcsár, B., Péter, T.: Design of intelligent traffic control system. ERCIM NEWS NO. 64, pp. 38-39, April 2006

6.1.2 Magyar nyelvű folyóirat

- [V-5] Kulcsár Balázs, Varga István, Bokor József: Modern közúti forgalomirányítás I., A forgalmi paraméterek becslése. Városi Közlekedés 2005/1 pp. 23-26.
- [V-6] Varga István, Kulcsár Balázs, Bokor József: „Automatikus eseménydetektálás állapot-megfigyelővel” Közlekedéstudományi Szemle LVI. évfolyam 6. szám, (2006. június) pp. 208-214.
- [V-7] Varga István, Kulcsár Balázs, Bokor József: Modern közúti forgalomirányítás II., Jelzőlámpás szabályozás. Városi Közlekedés 2006/3 pp. 161-165.

6.1.3 Idegen nyelvű konferencia

- [V-8] P. Gáspár, I. Szászi, T. Bartha, I. Varga, J. Bokor, L. Palkovics and L. Gianone: „Visual lane and obstruction detection system for commercial vehicles,” in Proceeding. of the SafeProcess '2000 Conference, vol. 2, pp. 908-913, Hungary, June 2000.
- [V-9] István Varga, Balázs Kulcsár, József Bokor: General Moving Horizon Estimation of Traffic Systems. The 12th Mediterranean Conference on Control and Automation. Kusadasi, Aydin, Turkey, June 6- 9, 2004. „\pdfs\med_pdfs\1125.pdf”

- [V-10] Balázs Kulcsár, István Varga: Simulation Of Turning Rates In Traffic Systems. The 16TH EUROPEAN SIMULATION Symposium (ESS2004). Budapest, Hungary, October 17-20, 2004, ISBN: 1-56555-286-5 (book), pp. 291-296; ISBN: 1-84233-106-X (CD) „\pdf\log-39.pdf”
- [V-11] Kulcsár, B., Varga, I., Bokor, J.: „Constrained Split Rate Estimation by Moving Horizon” 16th IFAC World Congress Prague, Czech Republic, July 3-8, 2005, IFAC2005 DVD „\Fullpapers\03276.pdf “
- [V-12] Tamás Luspay, István Varga, Balázs Kulcsár: Modeling and parameter estimation in road traffic systems. MITIP September 11-12, 2006, Budapest pp.415-420.
- [V-13] Varga, I.: Connection between modern traffic management systems. Proceedings of the Symposium on euroconform complex retraining of specialists in road transport, (Budapest), pp. 333-338, Budapest University of Technology and Economics, Hungary, 9-15 June 2001
- [V-14] István Varga, Balázs Kulcsár, József Bokor: Traffic Light Control Using Moving Horizon Estimation. 9th MINI Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA 2004) pp. 453-464, Budapest, Hungary 8-10. November, 2004
- [V-15] Kulcsár, B., Varga, I., Bokor, J.: Estimation of road traffic parameters. In: Workshop on system identification and control systems. Budapest. Hungary 11. July, 2005

6.1.4 Magyar nyelvű konferencia

- [V-16] Varga I.: Korszerű forgalomirányító rendszerek. TEMPUS JEP-14191-99 "Euroconform Complex Retraining of Specialists in Road Transport" kurzus keretében, Miskolc, 2001. szeptember 21.
- [V-17] Varga I.: „Korszerű forgalomirányító központok”, az „Automatizált forgalomszámláló és kiértékelő rendszerek”, és a „Közúti forgalomirányító berendezések” című előadások a TEMPUS JEP-14191-99 kurzus keretében, Győr, 2001. október 1.

6.1.5 Elektronikus publikációk

- [V-18] Varga I., Katkó L., Molnár G., „Forgalomirányító Központok” BME Közlekedésautomatikai Tanszék, 1998. Segédlet. <http://www.kka.bme.hu/~kozut/>
- [V-19] Katkó L., Varga I., Molnár G., „Közúti forgalomirányító berendezések” BME Közlekedésautomatikai Tanszék, 1999. Segédlet. <http://www.kka.bme.hu/~kozut/>

- [V-20] Katkó L., Molnár G., Varga I., „Kombinált közúti-vasúti forgalomirányító rendszerek” BME Közlekedésautomatikai Tanszék, 1999. Segédlet. <http://www.kka.bme.hu/~kozut/>
- [V-21] Katkó L., Varga I., Molnár G., „A közúti közlekedési forgalom mérésének módszerei és technikai eszközei” BME Közlekedésautomatikai Tanszék, 2000. Segédlet. <http://www.kka.bme.hu/~kozut/>
- [V-22] Varga István, Kulcsár Balázs, „Forgalmi paraméterek mérése és becslése” BME Közlekedésautomatikai Tanszék, 2006. Segédlet. <http://www.kka.bme.hu/~kozut/>

6.1.6 Kutatási jelentés

- [V-23] Tóth János, Varga István: „A korszerű közlekedési forgalomirányító rendszerek.” TEMPUS JEP-14191-99 keretében (3.2 fejezet) 2001. (26 oldal)
- [V-24] Varga István: A közúti közlekedés forgalmi paramétereinek a mérése, a mérés helyettesítése becsléssel (1.1-K1-2) EJJT RET Kutatási jelentés 2005 (30 oldal)
- [V-25] Varga István, Kulcsár Balázs: A becslési módszerek alkalmazhatósága a közúti közlekedésben. (1.1-K1-3) EJJT RET Kutatási jelentés 2005 (21 oldal)
- [V-26] Bécsi Tamás, Varga István: A közúti közlekedésben előforduló anomáliák kiszűrése, incidensek detektálása. (1.1-K2-4) EJJT RET Kutatási jelentés 2005 (27 oldal)
- [V-27] Kulcsár Balázs, Varga István: A közúti közlekedési modellek paramétereinek vizsgálata a szabályozás szempontjából. Érzékenység vizsgálatok (1.1-K4-2) EJJT RET Kutatási jelentés 2005 (16 oldal)
- [V-28] Varga István: A közúti közlekedésben jelenleg használt forgalomirányítási módszerek (1.1-K4-3) EJJT RET 2005 (30 oldal)
- [V-29] Varga István, Kulcsár Balázs: A közúti forgalomirányításban jelenleg használt beavatkozó eszközök, és a modern forgalombefolyásoló rendszerek. (1.1-K4-4) EJJT RET Kutatási jelentés 2005 (17 oldal)
- [V-30] Matolcsi Máté, Varga István: Pozitív bilineáris rendszerek irányíthatósága. MTA SZTAKI 2006/5 (13 oldal)
- [V-31] Varga István, Kulcsár Balázs, Preitl Zsuzsa: Egyedi jelzőlámpás csomópont forgalomfüggő szabályozási lehetősége új módszerek segítségével. (1.1-K3-1) EJJT RET Kutatási jelentés 2006 (17 oldal)

6.2 Az értekezéshez közvetlenül nem kapcsolódó publikációk

6.2.1 Idegen nyelvű folyóirat

- [V-32] István Varga, Tamás Bartha, Alexandros Soumelidis: On-line Testing of the Reactor Protection System in the Paks Nuclear Power Plant. ERCIM NEWS NO. 56, pp. 33-34, Januar 2004

6.2.2 Idegen nyelvű konferencia

- [V-33] Varga, I. and Katics, B.: Testing concept for proper functioning of the reactor protecting system in the nuclear power plant of Paks. Proceedings of the 13th International DAAAM Symposium. (Vienna) pp. 587-588, Austria, 2002.
- [V-34] István Varga, Tamás Bartha, Alexandros Soumelidis, Béla Katics: A concept for on-line testing of distributed safety-critical supervisory systems. IMS 2003 7th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems Bp. pp. 175-180, Hungary, 6-8 April 2003
- [V-35] István Varga, Tamás Bartha, Géza Szabó, Bálint Kiss: Status and Actual Risk Monitoring in a NPP Reactor Protection System. 7TH International Conference On PSAM, Berlin 2004. pp. 2654-2659.
- [V-36] T. Bartha, I. Varga, A. Soumelidis, G. Szabó: „Implementation of a Testing and Diagnostic Concept for an NPP Reactor Protection System”, 5th European Dependable Computing Conference (EDCC-5), Springer-Verlag GmbH, ISBN: 3-540-25723-3, pp. 391.
- [V-37] I. Varga, G. Szederkényi, K. M. Hantos And J. Bokor: Modelling and model identification of a pressurizer at the Paks Nuclear Power Plant. In 14th IFAC Symposium on System Identification, pp. 678 – 683, 2006. CD\ID060210.pdf

6.2.3 Magyar nyelvű konferencia

- [V-38] Szabó Géza, Varga István, Bartha Tamás: Állapotmonitorozási és megbízhatósági információk integrálása erőművi informatikai rendszerekben. Acta Agraria Kaposváriensis. Volume8 No3 2004 ISSN 1418-1789, pp. 99-115
- [V-39] Bokor József, Bartha Tamás, Varga István: „Biztonsági kockázatok az irányítástechnikai architektúrában”, Szerkezetek élettartam gazdálkodása konferencia, MTA PAB – PA Rt, Pécs 2005. november 9.-11. CD- kiadvány (megjelenés alatt)