

Forgalom-szimuláció eltérő közegekben

Dr. Max Gyula

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszék,
1111 Budapest, Goldmann tér. 3. V2. épület 438,
Tel: +(06-1) 463-2713, E-mail: max@aut-bme.hu

Abstract: – A különböző közegekben zajló mozgások szimulációjára és analizésére számos, egymástól sokszor már alapjaiban is különböző szimulációs technika született. A létrehozott szimulációs rendszerek abban azonban megegyeztek, hogy néhány egyszerűsítő feltétel mellett a valóságot igyekeznek leírni. Bár ezek a rendszerek sokszor köszönőviszonyban sincsenek egymással, mégis számos esetben lehetőség van arra, hogy az egymásnak megfelelő leírási módszerek miatt egy másfajta közegben történő szimulációra használjunk fel a már létező, működő szimulációs rendszereket. Ebben az előadásban azt mutatjuk be, hogy egy a közlekedési hálózatok analizésére készített szimulációs rendszert hogyan használhatunk fel adathálózatok modellezésére.

Kulcsszavak: szimuláció, közlekedési hálózatok, adathálózatok.

1. BEVEZETÉS

Sokféle közlekedési problémát tanulmányoztak már az irodalomban [S. Maniccam 2006, R. Cucchiara et al., 2000, T.Q. Tang et al. 2004] közlekedési modellek segítségével. Ezek, a többnyire szimuláción alapuló tanulmányok egy része a gyalogosok [M. Muramatsu et al. 2000], vagy a mozgó objektumok [T. Q. Tang et al., 2005] dinamikus tulajdonságainak értékelésével foglalkozik. A szimuláció során egy dimenziós modellt használnak az országutakon vagy autópályákon folyó közlekedés leírásához [R. Nagai et al., 2005], míg az utcai közlekedés és a közlekedési dugók [D. Helbing et al., 1999] tanulmányozásában vagy járművek mozgásának akadályoztatásában [S. Kurata et al., 2003] már a kétdimenziós modell az elfogadott. Az adathálózatok esetében is hasonló a helyzet, mert itt is léteznek az utak, a mozgó objektumok, a várakozás és a parkolás is. Ha elvonatkoztatunk a sebességtől, vagy attól a vizuális rálátásról, amit a közlekedési hálózatok esetében megfigyelhetünk, a szállítás problémáját végpontok és csomópontok közötti áramlássá redukálhatjuk. Több helyen folynak kutatások abban a kérdésben, hogy hogyan lehet ezeket az áramlásokat minél jobb szimulációs eljárásokkal megvizsgálni. Jelen esetben arra, keresünk választ, hogy milyen feltételek mellett lehet egy közúti közlekedési szimulációra kidolgozott rendszert felhasználni adathálózatok szimulációjára. A bevezetőt követő fejezetben összefoglaló képet kapnak a vizsgálatba bevont új közúti közlekedési modellről [Péter Tamás 2007ab], majd a harmadik fejezetben

megadom azt a feltételrendszert, amely mellett az eredeti modellt adathálózatok szimulációjára is fel tudjuk használni. A negyedik fejezet az adathálózatokra felírható matematikai modellt tartalmazza, míg az ötödik fejezetben néhány szóban összefoglalom a cikk eredményeit.

2. KÖZÚTI KÖZLEKEDÉSI HÁLÓZATOK SZIMULÁCIÓJA

Közlekedési hálózatok szimulációja során alapvetően két modelltípust használunk. A makroszkopikus modell lényegében, gázmodell típusú, míg a mikroszkopikus modell ez egyes objektumok mozgásával kapcsolatos kérdésekre is keresi a válaszokat. Az is nyilvánvaló, hogy egy valóságos közúti közlekedési modell meglehetősen bonyolult rendszer, mert a benne szereplő résztvevők száma és egyben a humán tényezők hatása igen nagy. Általánosságban elmondható, hogy minden modell a saját szabályrendszere segítségével próbálja meg leírni a megfigyelt objektum és a környezete közötti összefüggéseket. Ezek az összefüggések azonban csak az események leírására koncentrálnak, és azt feltételezik, hogy a vizsgált folyamatok a szabályoknak megfelelően történnek meg. A valós élet azonban ettől lényegesen eltér, főleg azokban a rendszerekben, ahol megjelenik az ember is, mondjuk a szabályt nem mindig követő gyalogosok vagy gépjárművezetők formájában.

Közúti közlekedési modellünk részletes leírását [Péter Tamás 2007ab] munkáiban találjuk meg. A hálózati modell

megalkotásánál az egyedi szabályozáshoz kötött feltételek mellett figyelembe kellett venni számos geometriai és több külső tényezőt, szezonális hatást, stb. Mindezek mellett modellünkötől azt várjuk el, hogy hatékonyan fel tudja dolgozni a megfigyelt környezetben folyó eseményeket, azaz vegyen figyelembe minden olyan elemet, amely a rendszer működése során tényleges hatást gyakorol, és elhanyagolása eltorzítaná az eredményeket. A szimuláció során arra keresünk választ, hogy az általunk megadott feltételrendszer helyes-e írja-e le a valóságok, valamint választ kapunk-e az alkalmazásával olyan kérdésekre, mint a forgalom szabályozása, az optimális kapacitáskihasználás, a biztonság, a környezetvédelem, a gazdaságosság, vagy az ütközésmentes pályatervezés.

2.1 A közúti közlekedési rendszerekkel szemben támasztott követelmény- és feltételrendszer

Egy, a közúti közlekedés területére kifejlesztett új modellt vizsgálunk meg jelen munkámban. Mivel a későbbiekben is erre a modellre kívánok támaszkodni, részletesen bemutatom a modell felépítését, kialakításának feltételrendszerét, valamint a vele elérhető eredményeket is. Ez a modell azért érdekes, mert a közlekedés szempontjából a hálózat egészét helyezi a központi helyre. Ebben a modellben, a hálózatban ténylegesen szakaszok kooperálnak. A definiált parkolók, valamint az utak melletti parkoló sávok a hálózat működésében szintén, mint általánosított szakaszok vesznek részt, és ezek az elemek alkotják együtt a hálózati gráf csúcsait. Az irányított gráf élei dinamikus relációk, ugyan is a kapcsolatban álló, (kooperáló) csúcsok közötti kapcsolatok dinamikusak.

Nyilvánvaló, hogy egy közúti közlekedési modell, az irányába támasztott feltételek miatt, általában igen bonyolult rendszer, mert több geometriai jellemző szab feltételeket, számos egyedi szabályozás működik a rendszerben, igen nagyszámú résztvevő vesz benne részt, igen jelentős befolyása van a humán tényezőknek, valamint sokféle külső tényező, szezonális hatás, időjárás, stb. játszik benne szerepet! A fenti feltételek többsége olyan, amely lehetetlenné teszi lineáris modell alkalmazását, vagyis csak olyan szimulációs eszközök jöhetnek számításba, amelyek eredményeképp egy nemlineáris hálózati modellt kapunk. Ezeket, a rendszerhez kapcsolódó adottságokon, feltételeken változtatni nem igen tudunk, legfeljebb modellünkben elhagyhatunk, közülük néhányat.

Vizsgáljuk meg azt a követelmény-rendszert, amellyel ezt létrehozták:

1. matematikailag legyen korrekt és megalapozott,
2. a szimuláció esetén numerikusan gyors legyen,
3. szabályozás esetén valós idejű szabályozás valósuljon meg.

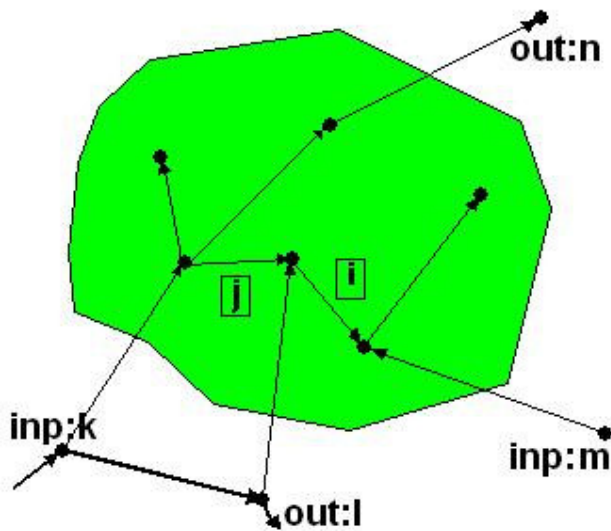
Ennek érdekében ez a hálózati modell speciális makroszkopikus modellt alkalmaz, ezáltal elkerüli a parciális differenciál-egyenletrendszerekre vezető matematikai modellt.

- A speciális modellben nem kap kitüntetett szerepet a csomópont!
- Szakaszok vannak, amelyek kooperálnak, vagy nem. (Pl. Speciális szakasz a parkoló is és kooperálhat pl. két párhuzamos sáv is).
- A modellben a járműsűrűség alatt azt az „s” ($0 \leq s \leq 1$) mérőszámot értjük, amely az egy szakaszon tartózkodó járművek együttes hosszának és a szakasz hosszának arányát méri. Parkoló esetén, az ott tartózkodó járművek száma és a parkolóban elhelyezhető maximális járműszám arányát méri.
- Ez a közúti közlekedési modell egy zárt görbe által körülhatárolt tartományban elhelyezkedő úthálózat szakaszakaszain, az áramlás következtében fellépő járműsűrűségeket vizsgálja.
- A tartományba beáramló és onnan kiáramló járműfolyamatokat ismeretnek tekinti. Ezeket a tartomány vizsgálatánál input és output folyamatoknak tekintjük.
- Ezek a közlekedési folyamatok, amelyek első ránézésre „inputjai” és „outputjai” a közlekedési rendszernek, valójában (a tartományon kívüli bevezető útszakaszokon mért járműsűrűségeket, mint gerjesztéseket, a tartományon kívüli kivezető szakaszokon mért járműsűrűségeket, pedig mint fojtások) együtt jelentik a matematikai modell input-folyamatait. Őket jelöljük $s_i(t)$ -vel ($0 \leq s_i(t) \leq 1$) és m külső szakasz esetén ($i=1,2, \dots, m$).
- A tartomány útszakaszain fellépő sűrűségek a rendszer állapotjellemzői. Őket jelöljük $x_i(t)$ -vel ($0 \leq x_i(t) \leq 1$) és n belső szakasz esetén ($i=1,2, \dots, n$).

Az n db. belső útszakaszból álló közúti/városi közlekedési hálózati modell egy zárt görbével körülhatárolt tartományában helyezkedik el. A zárt görbé úgy kerül felvételre, hogy a vizsgált n útszakaszból egyetlen egyet sem metszett át és a tartomány nem tartalmaz egyetlen olyan útszakaszt, vagy annak részletét sem, amelyet nem kívánunk vizsgálni. Ebben a tartományban (lásd. 1. ábra) a térkép alapján 1,2, ... ,n számmal megjelölve beszámozunk minden figyelembe veendő útszakaszt és parkolót.

A modellt továbbfejlesztett változatában a térkép alapján beszámozásra kerül minden olyan külső szakaszt is, amely közvetlen kapcsolatban áll valamely tartományon belüli szakasszal, tehát amely a közlekedési forgalom szempontból input szakaszt vagy output szakaszt jelent, ezeket rendre: 1,2, ... , m számmal lettek jelölve. (A gráf éleinek beszámozása, geometriai és kapcsolati adatainak rögzítése egér művelettel történik és ezek az adatok egy file-ba kerülnek. Egyúttal automatikusan megtörténik a szakaszok hosszának kiszámolásai is és a szakaszokon maximálisan megjeleníthető járműszámokat, egységjárműre számítva. A parkolóknál a maximális járműszámokat megadásra kerülnek. (A modell esetén, a tartomány nem szükségképpen egyszerűen összefüggő, ezáltal kéreg alatt bevezetett külső szakaszok is kapcsolódhatnak a modell belső szakaszaival.)

A hálózati matematikai modell megalkotásához alapvető fontossággal bírt a hálózatot definiáló kapcsolati mátrix,



1. ábra: Öt belső és négy külső útszakasszal megadott közötti közlekedési modell

amely egy hipermatrix és az alábbi négy kapcsolati matrixból áll:

1. a tartományon belüli folyamatok figyelembe vételét szolgálja a belső hálózati kapcsolati matrix
2. a tartományba kintől beáramló folyamatok figyelembevételét szolgálja a külső és belső hálózati elemek kapcsolati matrixa, amely az input kapcsolati matrix
3. a tartományból kiáramló folyamatok figyelembevételét szolgálja a belső és külső hálózati elemek kapcsolati matrixa, amely az output kapcsolati matrix, végül
4. a tartományon kívüli áramlatok figyelembevételét szolgálja a külső hálózati kapcsolati matrix.

Ez a modell tehát négy kapcsolati matrixot alkalmaz. A kapcsolati matrixok, átvitelt engedélyeznek vagy letiltanak a kapcsolatban álló elemek között egyrészt automatikusan, a hálózaton kialakult forgalom sűrűsége alapján, továbbá a szabályozások (lámpa, rendőr, stb.) szerint is. Kapcsolat esetén olyan sebességátvitelt biztosítanak az egyes csatlakozó szakasz-elemek között, amely figyelembe veszi ezek forgalomsűrűségeit, a meglévő forgalomcsillapítást ill., a forgalom-rásegítést is. A kapcsolati matrixok elemeinek fizikai tartalma az áramlási sebességet jelen. Egy kapcsolati matrix felépítése oszloponként történik: végig megyünk minden j szakaszon és a j -ik oszlop minden olyan i -ik sorába beírjuk a K_{ij} kapcsolati függvényt ($i \neq j, 1 \leq i, j \leq n$), ahol a gráf felépítésénél nemzérus kapcsolati kód adódott.

A kapcsolati matrix K_{ij} kapcsolati függvényénél figyelembe kell venni minden, a forgalmi rend kialakításánál meghatározott szabályozási kapcsolati jellemzőt (pl. lámpa, vagy lámpa nélküli útszakasz, parkoló, stb. kapcsolatokat),

ezeket írja le a $k_{ij}(t)$ függvény. Ezen kívül figyelembe kell venni, hogy a forgalom létrejöttékor fellépnek belső szabályozási automatizmusok is! A modell, a forgalom sűrűségétől függő belső szabályozásokat veszi figyelembe az $S_i(t)$, $E_j(t)$ és $v_{ij}(t)$ függvények alkalmazásával. Így tehát $K_{ij} - t$ négy tényező határozza meg.

A $k_{ij}(t)$ függvény jelentése sokféle:

- Elméletben az értéke, ha lámpa van az 1 vagy 0 értékeket veszi fel, a lámpa állapota szerint.
- A gyakorlatban előforduló további jelenségek a modellben is figyelembe vehetők: így például az, hogy a járművek nem azonnal indulnak el amikor zöldre vált a lámpa, hanem késleltetve, tehát egy „fűrészfog” szerű felfutással éri el 0-ról az 1 értéket. Ha azt is modellezni kívánjuk, hogy a sárgára (és sajnos még a pirosra) váltáskor is előfordulhat „jármű-átfutás”, akkor az 1-ről 0-ra is egy folytonos függvény szerint megyünk át. Ezeket a gyakorlatban fellépő jelenségek az átbocsátásnál a zöld időben alkalmazott „trapéz-szerű” lámpajel alkalmazásával lehet figyelembe venni.
- Ha állandó, lámpánélküli kapcsolat van és a j szakasz csak i -re dolgozik, akkor 1 konstans az értéke, ha nincs geometriai kapcsolat a két szakasz között, akkor 0 konstans.
- Ha a j -ik szakasz több szakaszra dolgozik lámpa nélkül, akkor $0 < \alpha_{ij}(t) < 1$ elosztási arányt vesz fel, ahol egy j - oszlopban $\sum(j) \alpha_{ij}(t) = 1$.
- Ha a kapcsolatot zavarják, pl. keresztező járművek, gyalogosok vagy baleset, akkor $0 < \beta_{ij}(t) < 1$ zavarási tényező értéket vesz fel.
- Ha a kapcsolatot segítik, pl. másik irányt keresztező járművek vagy rendőr, akkor $1 + \beta_{ij}(t)$ rásegítési tényező értéket vesz fel $0 < \beta_{ij}(t)$.
- Ha egyszerre van jelen elosztás és zavarás ill. elosztás és rásegítés is, akkor $\alpha_{ij}(t) \beta_{ij}(t)$ ill. $\alpha_{ij}(t) [1 + \beta_{ij}(t)]$ szorzat lép fel.
- Az α_{ij} és β_{ij} lehetnek konstans értékek is, de a modell finomítása során inkább $\alpha_{ij} = \alpha_{ij}(t)$, $\beta_{ij} = \beta_{ij}(t)$ időtől függő függvények a jellemzőek.
- A parkoló és útszakasz kapcsolatát $\gamma_j = \gamma_j(t)$, függvénnyel adjuk meg, $0 \leq \gamma_j(t)$.

Az (E1) egyenlet által leírt S_i automatikus belső önszabályozási függvény 1 vagy 0 értékeket vesz fel. Kapcsolat engedélyezése, ha az i -ik szakasz sűrűsége $x_i(t)$ kisebb, mint 1, egyébként 0.

$$S_i(x_i(t)) = \begin{cases} 1 & , & x_i(t) < 1 \\ 0 & , & x_i(t) = 1 \end{cases} \quad (E1)$$

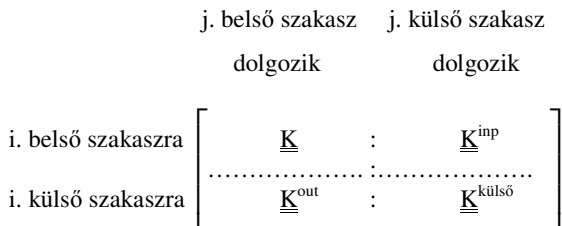
Az (E2) egyenlet által leírt E_j automatikus belső önszabályozási függvény is 1, vagy 0 értékeket vesz fel. Kapcsolat tiltása, ha a j -ik szakasz sűrűsége $s_j(t)$ kisebb, vagy egyenlő 0, egyébként 1.

$$E_j(x_j(t)) = \begin{cases} 1 & , & 0 < x_j(t) \\ 0 & , & x_j(t) = 0 \end{cases} \quad (E2)$$

$\left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \dots \\ x_j(t) = 0 \end{array} \right.$
 A $v_{ij}(t)$ a j-ik szakaszból i-ik szakaszra történő áthaladás sebessége, amely a csatlakozó szakaszok sűrűségeinek függvénye, $v_{ij}(t) = f(x_i(t), x_j(t))$. A kapcsolat leírására az irodalom számos függvénytípust ajánl, amelyek mérésekből adódó kapcsolatok, és regressziós módszerek eredményeként kapott függvények, azonban a lényegi összefüggést tartalmazzák, növekvő járműsűrűség esetén a járművek haladási sebessége monoton csökken.

A fődiagonális j-ik helyén szereplő K_{jj} kapcsolati függvényt, a belső hálózati kapcsolati mátrix és az output kapcsolati mátrix j-ik oszlopban szereplő K_{ij} ($i \neq j$) függvények összegének ellentettje adja, mivel minden realizált átadás esetén a j-ik belső szakaszból elvonás történik. Létezik az az eset is, hogy az m db. külső szakasz némelyike egymásra is dolgozik, azonban jelen esetben a matematikai modell szempontjából ez nem releváns, mivel a közvetlen input és output szakaszok sűrűségeit mérjük és a mért értékek kialakulása már figyelembe vette ezeket a külső kapcsolatokat is. Ezen kívül, ha egy input külső szakaszra is dolgozik, ezt az elosztást már figyelembe lett véve az input kapcsolati mátrix felépítésénél.

A modellünk négy különböző kapcsolati változatot vesz figyelembe, ezáltal hiper-mátrixa, a tárgyalat négy kapcsolati mátrixból épül fel az alábbi 2. ábra szerint.



2. ábra. A kapcsolati mátrixokból álló kapcsolati hiper-mátrix

Az egymáshoz csatlakozó szakaszoknál a v_{ij} sebesség értéke a t időpillanatban, az együttes szakaszon fellépő sűrűségektől függ. Lásd 1. ábra, amely városi forgalomra vonatkozik és több lehetséges függvényt is bemutat, amelyek figyelembe veszik a különböző útviszonyokat is. A V_{max} , ill. a függvény lefutásának változtatása további tényezők vizsgálatát is lehetővé teszi, időjárás, látási viszonyok stb.

A modell t időpontban és a t+Δt időpontban vizsgálva hálózaton kialakult helyzetet. Egymáshoz csatlakozó szakaszokon Δt időtartam alatt a v_{ij} sebességgel átáramló járművek Δl= $v_{ij} \Delta t$ úthosszat tesznek meg. 100%-os járműsűrűség esetén és h várható (átlagos) járműhossz érték mellett a Δn átadott járműszám: Δn= Δl/h= $v_{ij} \Delta t/h$.

Természetesen a j szakaszból ténylegesen átadott járműszámot befolyásolja a j szakaszon mérhető s_j járműsűrűség értéke is, így: Δn= $s_j v_{ij} \Delta t/h$. Ez alapján a hálózat egyes szakaszain tartózkodó járművek számát t+Δt

időpontban az alábbi egyenletrendszer (E3) írja le, ahol a zárójeles alsóindex a mátrix méretét mutatja:

$$N_{(n \times 1)}(t+\Delta t) = N_{(n \times 1)}(t) + [K_{(n \times n)}, K^{inp}_{(n \times m)}] * \begin{bmatrix} \underline{N}^a_{(n \times 1)} \\ \dots \\ \underline{N}^{inp}_{(m \times 1)} \end{bmatrix} \quad (E3)$$

Az $N^a_{(n \times 1)} = [x_j(t)] \Delta t/h$, a belső szakaszoknál, az $N^{inp}_{(m \times 1)} = [s_j(t)] \Delta t/h$ a külső j-ik szakaszból, 1m/s sebesség mellett átadott járműszámokat tartalmazó vektorok. (A tartomány belső szakaszairól a tartományból kiáramló járműfolyamatot a $K_{(n \times n)}$ mátrix főátlójában vette figyelembe a modell.)

Részletesebben felírva kapjuk az (E4) egyenletrendszert:

$$N_{(n \times 1)}(t+\Delta t) = N_{(n \times 1)}(t) + K_{(n \times n)} [k_{ij}(t) S_i(t) E_j(t) v_{ij}(t)] N^a_{(n \times 1)} [x_j(t)] \Delta t/h + K^{inp}_{(n \times m)} [k^{inp}_{ij}(t) S_i(t) v_{ij}(t)] N^{inp}_{(m \times 1)} [s_j(t)] \Delta t/h \quad (E4)$$

A fenti egyenlet differencia egyenletként nagyméretű nemlineáris hálózatok szimulációs vizsgálatára alkalmazható. A szakaszokon időben kialakuló járműsűrűség függvények t-szerint differenciálható függvények (mivel a járművek áramlási sebesség a szakaszokon t-szerint differenciálható függvények és a járműsűrűsége felírt, sebességtől függő analitikusan megadott függvények a sebesség szerint szintén differenciálható függvények).

Rendezve az (E4) differencia egyenletet és $\Delta t \rightarrow 0$ határátmenet alkalmazva, a szakaszok sűrűségére az alábbi elsőrendű nemlineáris mátrix differenciál-egyenlet-rendszert (E5) írható fel:

$$\langle I_i \rangle_{(n \times n)} \dot{\underline{X}}'_{(n \times 1)}(t) = \begin{bmatrix} K_{(n \times n)} [k_{ij}(t) S_i(t) E_j(t) f(x_i(t), x_j(t), s_j(t))] x_{(n \times 1)} [x_j(t)] + K^{inp}_{(n \times m)} [k^{inp}_{ij}(t) S_i(t) f(x_i(t), s_j(t))] s^{inp}_{(m \times 1)} [s_j(t)] \end{bmatrix} \quad (E5)$$

Tehát a nemlineáris közlekedési hálózati rendszer \underline{x} állapotjellemző vektorára az alábbi tömörebb alakú differenciálegyenlet-rendszer (E6) adódott:

$$\dot{\underline{X}}'_{(n \times 1)} = \langle I_i \rangle_{(n \times n)} [\underline{K}_{(n \times n)} \underline{X}_{(n \times 1)} + \underline{K}^{inp}_{(n \times m)} \underline{S}^{inp}_{(m \times 1)}] \quad (E6)$$

Ahol: \underline{K} , és \underline{K}^{inp} kapcsolási mátrixok elemei, a kapcsolási függvényeket és a sűrűségi állapotoktól függő függvényeket tartalmazzák.

3. A KÖZÚTI KÖZLEKEDÉSI HÁLÓZATOKAT LEÍRÓ FELTÉTEL- ÉS KÖVETELMÉNYRENDSZER KITERJESZTÉSE AZ ADATHÁLÓZATOKRA

A számítógép-hálózatok célja, hogy üzeneteink biztonságosan, információ deformításoktól mentesen, lehetőleg minél gyorsabban jussanak el a feladótól a címzettig. A folyamat modellezése során az aktuálisan folyó műveleteket igyekszik a vizsgált alrendszer szabályozni. Az emberi tényezőkön kívül szinte minden összetevő, amit a közúti közlekedési hálózatok modellezése esetében fontosnak tartottunk, eleme a számítógép-hálózatok modellezésének is.

Nyilvánvaló, hogy egy számítógép-hálózati modell is igen bonyolult rendszer és a modell kialakításához ugyanazokat a feltételeket kapcsolhatjuk, mint a közlekedési modellhez, azaz

- számos geometriai jellemző szab feltételeket. Pl. a jelterjedési sebesség és a vonalon visszaverődő jelek zavarása miatt két csomópont távolsága nem léphet túl egy bizonyos mértéket (pl.: alapsávú Ethernet esetében ez kb. 600 m).
- számos egyedi szabályozás működik. Pl. Egy csomópont csak akkor adhat ki üzenetet, ha előtte megszerezte az adási joghoz szükséges zsetont (ezzel az üzenetek ütközését kerülük el két vagy több csomópont között).
- igen nagyszámú résztvevő kap szerepet.
- sokféle külső tényező (napszak, szezonális, stb.) játszik közre.

Mindezek mellett, használható adatforgalmi modellekkel szemben megmarad a hatékonyság, mint alapkövetelmény, valamint az, hogy a modell vegyen figyelembe minden olyan elemet, amely a rendszer működése során tényleges hatást gyakorol, és elhanyagolása eltorzítaná az eredményeket, azaz legyen meg a matematikai korrektség és megalapozottság, a szimuláció esetén numerikusan kellően gyors legyen, végül szabályozás esetén valós idejű szabályozás valósuljon meg.

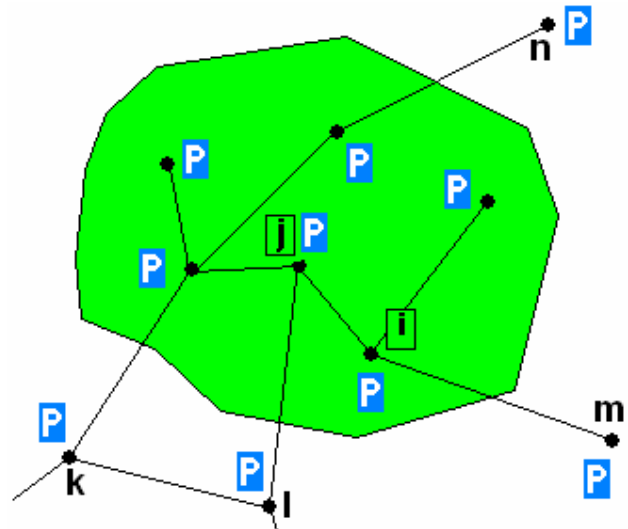
A feladatok meghatározásában már több, jelentős eltérés mutatkozik a közúti közlekedési hálózatok és a számítógép-hálózatok között. Ha például az 1. ábrán megadott modellt szeretnénk összehasonlítani egy hasonló felépítésű, a 3. ábrán felrajzolt, a számítógép-hálózatok esetében alkalmazott modellel, úgy meg kell adnunk a rendszerek közötti különbségeket és meg kell magyaráznunk, hogy hogyan oldhatók fel az eltérések, amennyiben ez szükséges.

Modellünkben megegyezik:

- adott topológiájú rendszer véges számú csomópontja által körülhatárolt zárt tartományban az adatáramlás következtében fellépő adatsűrűségeket vizsgáljuk. A zárt görbét úgy vettük fel, hogy csak a vizsgált n csomópontból álló tartományt és ezen csomópontokba be- illetve kifutó külső adatátviteli utakat foglalja magába. Így ez a megközelítés a klasszikus közlekedési hálózatokkal rokon.

Összefoglalva, a vizsgált adathálózat csomópontjai, a bemutatott közlekedési hálózat szakaszainak felelnek meg (ez utóbbi csak szakaszokból áll: útszakaszokból, ill. általánosított szakaszokból, amelyek a parkolók).

- az adatsűrűség alatt azt az „ s^* ” ($0 \leq s^* \leq 1$) mérőszámot értjük, amely egy időegység alatt kiadható csomagok hosszának és a ténylegesen kiadott csomagok hosszának arányát méri. (Bár megjegyezzük, hogy a közlekedési hálózatokkal szemben itt az „ s^* ” független a csomópontokat összekötő ívek hosszától.)
- adattárolás (parkolás) esetén, amely mindig a csomópontokban történik, vagyis a csomópontok parkolókként (általánosított szakaszokként) működnek, az adott csomópontban tárolható adatmennyiség nagyságának és a csomópontban elhelyezhető maximális adatmennyiségnek az arányát mérjük.
- a tartományba beáramló és onnan kiáramló adatsűrűségeket mérhetőknek tekintjük. Ezeket a tartomány vizsgálatánál külső input és külső output folyamatoknak (gerjesztéseknek) tekintjük és ($0 \leq s_i(t) \leq 1$)-vel jelöljük, ahol m külső szakasz esetén $i=1, 2, \dots, m$. Mindezek mellett belső input és output folyamatok is fellépnek, amit az előzőekhez hasonlóan ($0 \leq x_i(t) \leq 1$) jelölünk, ahol n belső szakasz esetén $i=1, 2, \dots, n$.



3. ábra: Hat belső és négy külső csomóponttal rendelkező adathálózat közúti közlekedési szimulációs modellje

Modellünkben nem egyezik meg:

- a klasszikus közlekedési hálózatokkal, struktúrájában rokon módon, az adathálózatoknál is kitüntetett szerepet kapnak a csomópontok (de ezek a fentiekben leírt szakaszok szerint kooperálnak egymással).
- egy létező fizikai átviteli közegen egy időben mindig csak egy üzenet (csomag) haladhat, de az adatutak mindig kétirányúak lehetnek.

- az adatátviteli utak, a csatornák képtelenek kooperálni egymással, kooperációra csak a csomópontok képesek
- egy adott csomópontból kilépő és az oda beérkező üzenetek számának különbsége nem egyezik meg a tárolt üzenetek számával, mert pl. az elárasztásos üzemmód esetén ugyanazt az üzenetet több helyről is megkaphatjuk, illetve ugyanazt az üzenetet több irányba is továbbküldjük

3.1 Az adathálózat kapcsolati mátrixának létrehozása a közúti közlekedési hálózatok kapcsolati mátrixának segítségével

Amennyiben a közúti közlekedési hálózat modelljét kívánjuk felhasználni, az adathálózati gráfunk alapján létre kell hoznunk a közúti hálózat kapcsolati mátrixához (közlekedési mátrix) hasonló felépítésű számítógép-hálózati adatforgalmi kapcsolati mátrixot (adatforgalmi mátrix). Egy kapcsolati mátrix felépítése, mindkét esetben úgy történik, hogy megvizsgáljuk vajon van-e összeköttetés az adathálózat i -ik és j -ik csomópontja között (itt a kooperáló elemeket csomópontoknak nevezzük). Az éppen aktuális kapcsolat irányát az index (hová, honnan) sorrendben mutatja. Amennyiben létezik ez a kapcsolat, akkor beírjuk a K_{ij} kapcsolati függvényt, egyébként nullát. Az adatkapcsolati mátrix tehát egy olyan hálózat feltérképezését jelenti, ahol az adathálózati gráf létező ágainál zérustól eltérő értékeket kapunk. Mivel a közúti közlekedési hálózat modellezésére felépített modell nem tartalmaz csomópontokat, ezért a csomópontokat parkolókként képzelhetjük el minden kapcsolat végén. Ez azt jelenti, hogy a külső bejövő szakaszok nem különböznek a belső szakaszoktól, a külső kimenő szakaszok végére, pedig egy-egy, az általunk vizsgált, zárt tartományunkban nem található csomópontot kell beiktatnunk a peremeken túl. Ezután az adatkapcsolati mátrix felépítése, figyelembe véve a fenti kiegészítéseket, meg fog egyezni a közúti közlekedési hálózat modelljének kapcsolati mátrixával. Mivel a csatornák, néhány egyszerűbb adathálózatot kivéve, kétirányú kommunikációra képesek, bár egy időpillanatban mindig egyirányúak, ezért a kapcsolati mátrix a főátlóra nézve szimmetrikus. A fődiagonális j -ik helyén szereplő K_{ij} kapcsolati függvényt, a belső hálózati kapcsolati mátrix és az output kapcsolati mátrix j -ik oszlopban szereplő K_{ij} ($i \neq j$) függvények összegének ellentettje adja, mivel minden realizált átadás esetén a j -ik belső szakasról elvonás történik.

Ezek után vizsgáljuk meg a kapcsolati függvény felépítését adathálózatok esetén! Mely elemeket tudunk és mely elemeket nem tudunk felhasználni az eredeti kapcsolati függvényből. Az eredeti kapcsolati függvény felépítése a következő:

- A $k_{ij}(t)$ függvény jelentése sokféle, melyek közül a két modellben megegyezik az, hogy
- alapértelmezés szerint, amennyiben az i és j csomópontok közötti adatátviteli csatorna szabad értéke 1 lesz, ellenkező esetben 0
 - ha állandó egyirányú, huzalozott kapcsolat van az i és j csomópontok között, akkor $k=1$.

- ha nincs geometriai kapcsolat a két szakasz között akkor $k=0$.
- ha a kapcsolatot zavaró tényezők korlátozzák, pl. a fogadó csomópont kéri a csomagok számának csökkentését, akkor $0 < \beta_{ij}(t) < 1$ zavarási tényező értéket vesz fel.
- Ha a kapcsolatot a fogadó állomás segíti azzal, hogy pl. a más irányból érkező csomagok számára korlátozást kér, akkor $1 + \beta_{ij}(t)$ rásegítési tényező értéket vesz fel $0 < \beta_{ij}(t)$.
- Ha egyszerre van jelen elosztás és zavarás ill. elosztás és rásegítés is, akkor $\alpha_{ij}(t) \beta_{ij}(t)$ ill. $\alpha_{ij}(t) [1 + \beta_{ij}(t)]$ szorzat lép fel.
- Az α_{ij} és β_{ij} lehetnek konstans értékek is, de a modell finomítása során inkább $\alpha_{ij} = \alpha_{ij}(t)$, $\beta_{ij} = \beta_{ij}(t)$ időtől függő függvények a jellemzőek.
- A két csomópont kapcsolatát, vagyis az adatforgalom időbeli lefolyását a $\gamma_{ij} = \gamma_{ij}(t)$, függvénnyel adjuk meg, ahol $0 \leq \gamma_{ij}(t)$, valamint a tényleges adatforgalom nemcsak az idő, hanem az adatsűrűség függvénye is (Ha nincs adat, nincs mit adni.).
- Az $S_i(t)$ automatikus belső önszabályozási függvény és az $E_j(t)$ automatikus belső önszabályozási függvény értelmezése megegyezik.

A modellekben nem egyezik meg az, hogy

- Mivel a gyakorlatban, még nagysebességű hálózatok esetében is egy bitidőnél kevesebb időre van szükség annak eldöntésére, hogy a csatorna szabad-e vagy sem, a közúti közlekedési hálózat modelljénél alkalmazott „fűrészfog” vagy „trapéz”-szerű időfüggvényekre nincs szükségünk. Amennyiben a vonalon ütközés történt, k értékét 0-ra kell állítani.
- Mivel egy szakaszra mindig csak egy csomópont dolgozik rá, ezért adathálózatok esetén a közúti közlekedési hálózat modelljénél alkalmazott elosztási arány, az $\alpha_{ij}(t) = 1$.

4. EREDMÉNYEK ÉS AZ ADATHÁLÓZATRA FELÍRTHATÓ MATEMATIKAI MODELL

Az előző fejezetek alapján tehát elmondhatjuk, hogy a két rendszer kapcsolati hipermatrixának leírására, néhány paraméter értelmezésének különbsége ellenére, ugyanazt a modellezési technikát tudjuk esetünkben is használni.

Tekintsük a hálózatot t időpontban és vizsgáljuk a $t+\Delta t$ időpontban kialakult helyzetet. Egymással kapcsolatban álló csomópontoknál Δt időtartam alatt a v_{ij} átviteli sebességgel történő adattovábbítás során $\Delta b = v_{ij} * \Delta t$ adatbitet juttatunk át. 100%-os adatsűrűség esetén és h várható (átlagos) csomaghossz érték mellett a Δn átadott csomagszám: $\Delta n = \Delta l / h = v_{ij} * \Delta t / h$. A differenciálegyenlet-rendszer (E7) ebben az esetben is hasonló alakot nyer:

$$\underline{\mathbf{x}}'_{(n \times 1)}(t) = \quad (E7)$$

$$\langle \underline{\mathbf{L}} \rangle^{-1} [\underline{\mathbf{K}}_{(n \times n)} [k_{ij}(t) S_i(x_i(t)) E_j(x_j(t)) v_{ij}]] \underline{\mathbf{x}}_{(n \times 1)} [x_j(t)] +$$

$$\underline{\mathbf{K}}_{(n \times m)}^{inp} [k_{ij}^{inp}(t) S_i(x_i(t)) E_j(s_j(t)) v_{ij}] \underline{\mathbf{s}}_{(m \times 1)}^{inp} [s_j(t)]]$$

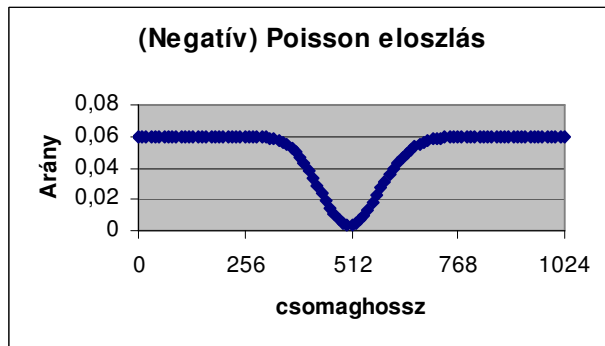
A rendszer x_j állapotjellemzői az alábbi adatsűrűségek:

Egy i csúcsban: $x_j(t) = n_j(t) / \text{Max } N_j$, ahol: $n_j(t)$ a csomópontban lévő csomagok száma t időpillanatban, míg $\text{Max } N_j$ a csomópontban lévő maximális csomagok száma.

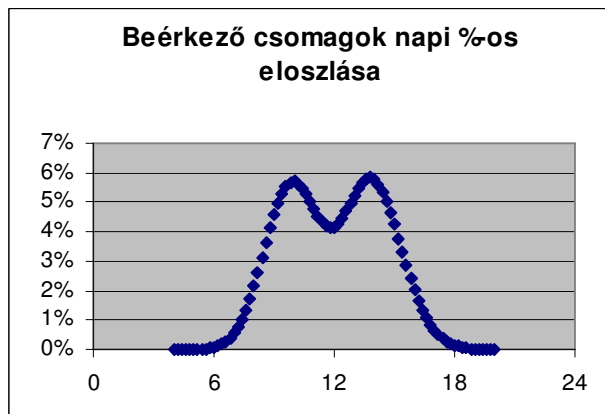
További jelölések:

$s_j(t)$ a tartományon kívüli csomópontban t időpillanatban mért adatsűrűségek ($i=1,2, \dots, m$), v_{ij} a j -ik csomópontból i -ik csomópontba (csúcsoktól függő) átviteli sebesség, $\langle \underline{L} \rangle$ diagonális mátrix, főátlójában a csomópontok fiktív l_j hosszai vannak $l_j = \text{Max } N_j \cdot h$ ($i=1,2, \dots, n$). Abban az esetben, ha $v_{ij} = \text{konstans}$, ez kiemelhető az egyenletben. A rendszer ekkor is nemlineáris, mert az $S_i(x_i(t))$ és $E_j(x_j(t))$ állapotfüggő függvények.

Adathálózatunk analízise során a közúti közlekedési hálózat modelljénél alkalmazott számításokat követjük végig, azzal a különbséggel, hogy a csomagok hossza a 4. ábra, míg a csomópontokhoz való érkezésük ideje az 5. ábra szerinti Poisson-eloszlást követi. Ez a feltételezés részint azzal magyarázható, hogy a file-ok csomagokra történő felbontása során a keletkező maximális méretű csomagok száma nagy, másrészt a megérkezett csomagok visszaigazolását igazoló válaszcomagok mérete nagyon rövid.



4. ábra: Az adathálózat üzeneteinek várható hossza



5. ábra: Az adathálózat üzeneteinek várható időbeli eloszlása

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Látható, tehát, hogy adathálózatoknál, a vizsgált tartománybeli csomópontok adatsűrűségét és a közúti közlekedés forgalomsűrűségét leíró differenciálegyenlet-rendszerek hasonló felépítésűek. Mindebből az következik, hogy a két rendszer egymás analógiájára üzemel, bizonyos kritériumok megadása mellett. Alapvetően két kritérium szükséges az analógia biztosításához.

1. a közúti közlekedési hálózatban parkolóknak kooperációja az, amely együttesen reprezentálja az adathálózatok csomópontjainak kooperációját,
2. a közúti közlekedési hálózatban megadott útszakaszon egy időben csak egy jármű haladhat.

Ez a két feltétel azt jelenti, hogy az új közúti közlekedési hálózati modell felülről kompatibilis az adathálózati modellel, vagyis a közúti közlekedési hálózat modellje alkalmas adathálózatok szimulációjára is viszont ez fordítva nem igaz.

IRODALOMJEGYZÉK

- R. Cucchiara, M. Piccardi, and P. Mello (2000). Image analysis and rule-based reasoning for a traffic monitoring system”, in *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, **1, 2**. pp. 119 – 130.
- D. Helbing, A. Hennecke, M. Treiber (1999). Phase Diagram of Traffic States in the Presence of Inhomogeneities, *Physical Review Letters* **Vol. 82**, pp. 4360-4363.
- S. Kurata, T. Nagatani (2003). Spatio-temporal dynamics of jams in two-lane traffic flow with a blockage. *Physica A* **318**, pp. 537–550.
- S. Maniccam (2006). Adaptive decentralized congestion avoidance in two-dimensional traffic. *Physica A* **363** pp. 512–526.
- M. Muramatsu, T. Nagatani (2000). Jamming transition in two-dimensional pedestrian traffic. *Physica A* **275** pp. 281.
- R. Nagai, T. Nagatani, N. Taniguchi (2005). Traffic states and jamming transitions induced by a bus in two-lane traffic flow. *Physica A* **350**, pp. 548–562
- Péter Tamás (2007). Nagyméretű nemlineáris közlekedési hálózatok modellezése. *Közlekedéstudományi szemle*, **9. LVII. Évf.** pp. 322- 331.
- Péter Tamás (2007). Nagyméretű közúti közlekedési hálózatok analízise. *Innováció és fenntartható felszíni közlekedés - konferencia*. Budapest. <http://www.kitt.bmf.hu/mmaws/index.html>
- T.Q. Tang, H.J. Huang (2004). Continuum models for freeways with two lanes and numerical tests. *Chin. Sci. Bull.* **49**, pp. 2097–2104
- T. Q. Tang, H.J. Huang, Z.Y. Gao (2005). Stability of the car-following model on two lanes. *Phys. Rev. E* **72**, no. 066124.