

FORGALOMSZIMULÁCIÓ AZ UTAKON

Max Gyula

Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszék
1521 Budapest, Pf. 91, e-mail: max@aut.bme.hu

Összefoglalás

Az utakon közlekedő járművek száma évről évre nő. Miközben a zsúfoltság nő, a közlekedésben résztvevők egymás iránti megértőképessége egyre csökken. Mind gyakoribbak az utakon a szabálytalanságok, amelyek jelentős baleseti forrást jelentenek. A szabálytalankodók kiszűrése sokszor életet menthet. A veszélyforrást jelentő események felismerésére és kezelésére térfigyelő rendszereket használunk. A képi információk feldolgozása és értékelése azonban nagyon időigényes feladat még a mai gyors számítógépeink számára is. A cikk arra keresi a választ, hogy szimulációs eszközök segítségével, milyen pontossággal lehet az egyes közlekedési eseményeket szimulálni és ezzel hogyan lehet megnövelni az adatfeldolgozásra szánt időt.

Kulcsszavak: képfeldolgozás, forgalomkövetés, közlekedési szabályok, szimuláció

1. Bevezetés

A közlekedés manapság sok kellemetlenség okozója. Mindennap hallunk forgalomelterelésekről, balesetekről vagy dugókról szóló híreket. A többsávos utak sem jelentenek mindenhol megoldást főleg, ha figyelembe vesszük ezek helyigényét. A rosszkedvű, arrogáns vagy ittas vezetők is egyre nagyobb veszélyt jelentenek a zsúfolt utakon. Legtöbbjük figyelembe sem veszi a közlekedési szabályokat, így okozva balesetet egy hirtelen kanyarodással vagy helytelen sebesség megválasztással. A veszélyforrást jelentő események gyors felismerésére, kezelésére és rögzítésére térfigyelő rendszereket használunk. Ezek a rendszerek mind több és jobb minőségű információt adnak a megfigyelt területekről. Elméletileg az automatikusan gyűjtött közlekedési információk már real-time módon, előfeldolgozott formában is hozzáférhetőek. Az összegyűjtött adatok mennyisége azonban sok esetben lehetetlenné teszi az adatok gyors feldolgozását, nem beszélve arról, hogy az adatfeldolgozás még nem jelent értékelést vagy döntés előkészítést. Időre van szükségünk arra, hogy az adatok automatikus értékelése során megállapíthassuk egy adott közlekedési szituációról, hogy az szabályosan vagy szabálytalanul történt-e. A biztonság szempontjából, természetesen jobb megoldást jelentene az az értékelési forma, amely során nem a folyamat végén, hanem már közben is kaphatnánk legalább részletes információt az aktuális történésekről. Az ilyen gyors értékelési mechanizmusok eszközei lehetnek a szimulációs modellek. A szimulációs modellek segítségével nem kell a folyamat minden egyes pillanatát végigkövetnünk, elegendő, ha meghatározott időközönként összevetjük a valós és a szimulált eredményeket. Az így felszabadult idő további adatfeldolgozásra fordítható.

Sokféle közlekedési problémát tanulmányoztak már az irodalomban [1-11] közlekedési modellek segítségével. Ezek a többnyire szimuláción alapuló tanulmányok egy része a gyalogosok [1], vagy a mozgó objektumok [2] dinamikus tulajdonságainak értékelésével foglalkozik. A szimuláció során egy dimenziós modellt használnak az országutakon vagy autópályákon folyó közlekedés leírásához [4, 7], míg az utcai közlekedés és a közlekedési dugók [3] tanulmányozásában vagy járművek mozgásának akadályoztatásában [10] már a kétdimenziós modell az elfogadott. Ezek a modellek saját szabályrendszerük segítségével próbálják meg leírni a környezeti összefüggéseket. A felhasznált 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. Szabálytalan gyalogosok vagy gépjárművezetők közlekednek az utakon. Emberi erőforrásban

szűkolködő környezetünkben leegyszerűbben automatikus eszközök segítségével lehet felismerni és kiszűrni a közlekedés szabálytalan résztvevőit. Ennek a folyamatnak képfeldolgozással kell kezdődnie. A szabálytalanságok felismeréséhez szükségünk van az egymás után érkező képkockákon legalább a statikus (háttér) és a dinamikus (közlekedési esemény) felismerésére, majd a dinamikus rész szegmentálására. Azonban például egy, a buszsávban haladó járműről néhány képkockányi információ alapján nehéz eldönteni, hogy az szabályosan vagy szabálytalanul halad-e az adott sávban. Ahhoz, hogy pontos választ tudjunk adni erre a kérdésre, először osztályoznunk kell a járművek fajtáját, megállapítva azt, hogy busz vagy egyéb jármű halad-e a vizsgált sávban. Másodsor, ha nem busz a vizsgált jármű, akkor el kell tudnunk dönteni azt is, hogy a jármű pl. kanyarodási szándéka miatt szabályosan tartózkodik-e a buszsávban, vagy csak a gyorsabb előrejutás szándékából, szabálytalanul választotta ezt a sávot. A döntéselőkészítés nem egyszerű feladat. Egyrészt nélkülözhetetlen tulajdonsága a rendszernek a közlekedési szabályok ismerete, másrészt real-time módon kell reagálnia az eseményekre. A fenti feladatok elvégzésére véges idő áll rendelkezésünkre. Az alapvető kérdés az, hogy legalább milyen gyakorisággal kell az objektum mozgását követnünk ahhoz, hogy értékelési szempontból pontos képet kaphassunk az objektum mozgásáról, valamint a cél elérése érdekében milyen modellezési eszközöket használhatunk fel? Más szavakkal ez azt jelenti, hogy megtudjuk-e növelni a mai átlagosan 24-25 képkockát készítő kamerák periódusidejéből számított 40 ms-nyi adatfeldolgozási időt és ha igen, akkor milyen eszközök segítségével? Ez a cikk azon eljárások közül mutat be két szimulációs eljárást, amelyek segítségével meg lehet növelni a feldolgozási időt, elegendő időt hagyva ezzel a közlekedési helyzet értékelésére és a döntéselőkészítésre. A cikkben először a szimulációs eljárások metodikáját ismertetjük, bemutatva a közlekedés paramétereinek közötti összefüggéseket, majd a mérési eredmények alapján bemutatjuk a lehetséges megoldásokat és a szimulációból levonható következtetéseket is.

2. Mozgó objektumok modellezése

Modellünk két szimulációs eljárást tartalmaz. A szimuláció során mindkét esetben, egy kétdimenziós négyzettrácsos felületen reprezentáljuk a mozgást egyszerű mozgási (közlekedési) szabályok figyelembevételével. A mozgási szabályok felállításának az a feladata, hogy követni tudjuk az objektumok irányváltozásait, valamint az objektumok előző paraméterértékeit felhasználva meg tudjuk adni a mozgó objektumok tulajdonságait megadó új paramétereket. Mozgó objektumaink fel, le vagy jobbra, balra mozoghatnak a felületen. A közlekedési viszonyok jobb modellezése érdekében egy adott irányban történő mozgás során a közvetlen visszafelé történő mozgás ugyan nem megengedett, valószínűsége azonban nullánál nagyobb. Számítógépes modellünk szekvenciális frissítési szabályokat követ és a szimuláció során a változó mozgásirányok hatását is tanulmányoztuk.

2.1. A szimulációs modell

A szimuláció alapja mindkét esetben egy négyutas közlekedési modell, nagyszámú, a felület méreteihez viszonyítva kisméretű mozgó objektummal, ahogy azt az 1. ábra mutatja. Négyféle mozgásirány létezik, melyek során a mozgó objektumaink vagy fel, vagy le, vagy jobbra, vagy balra tudnak mozogni. Egy időpillanatban azonban csak egy irányba. Minden objektumnak vagy egy választott mozgásiránya, azaz mozoghatnak előre, oldalra, hátra vagy mozgás nélkül megmaradhatnak előző állapotukban. A négyzettrácsos felületet egy kockáját, egy időben csak egy jármű foglalhatja el, mert az ellenkező eset a balesetet reprezentálja. Kezdetben az objektumokat véletlenszerűen, de adott ρ sűrűséggel helyezük el a felületen. Egy adott időpillanatban a le, fel, jobbra vagy balra mozgó objektumokat fekete, kék, piros és zöld színekkel jelöltük. Egy-egy szimulációs futtatás során az objektum-sűrűség állandóságát úgy biztosítjuk, hogy egy periódusnyi idő alatt a szimulációs területre belépő és az azt elhagyó objektumok száma megegyezik. Az objektumok tulajdonságainak leírására azok sűrűségét, pozícióját, sebességét és mozgásirányát használjuk, melyek alatt a következőket értjük:

Egy-egy szimuláció során az objektum-sűrűség állandó maradt, mivel egy periódusnyi idő alatt a szimulációs területre belépő és az azt elhagyó objektumok száma megegyezett. Az objektumok tulajdonságainak leírására azok sűrűségét, pozícióját, sebességét és mozgásirányát használjuk, melyek alatt a következőket értjük:

A sűrűség, egy adott hosszúságú útszakaszon jelenlévő objektumok száma. Általában a sűrűséget objektum/kilométer alakban adják meg. A nagy sűrűség azt mutatja, hogy az egyes különálló objektumok nagyon közel vannak egymáshoz, míg a kis sűrűség az objektumok közötti nagyobb távolságra utal.

A pozíció az objektumok pontos helyét adja meg a vizsgált felületen, amelyet jelen esetben kétdimenziós koordinátáikkal adunk meg.

Az objektum sebességét definíció szerint az egységnyi idő alatt megtett úttal adjuk meg. A legtöbb esetben minden egyes objektumnak egy olyan sebessége lesz, amely valamennyiben különbözik a körülötte lévő összes többitől. A szimuláció során a mozgó objektumok átlagsebessége szignifikáns mutató. Az átlagsebességet meghatározhatjuk a vizsgált területen lévő objektumok sebességeinek átlagából. A cikk ez utóbbit jelöli sebességgel.

A forgalom az egyik leggyakoribb közlekedési paraméter, amely az út egy adott pontján, időegység alatt áthaladó objektumok számát adja meg, objektum/óra mértékegységben. Ugyancsak érdekes lehet még a szabad forgalom, amely az úton mozgó objektumok átlagsebességét adja meg alacsony objektumsűrűség mellett. Az alacsony objektumsűrűség esetén az egyes objektumok nincsenek hatással a többi mozgó objektumra. Ezek olyan sebességgel haladnak, amelyet kontrollálni tudnak, az útviszonyoknak és az előírt sebességhatárnak megfelelően.

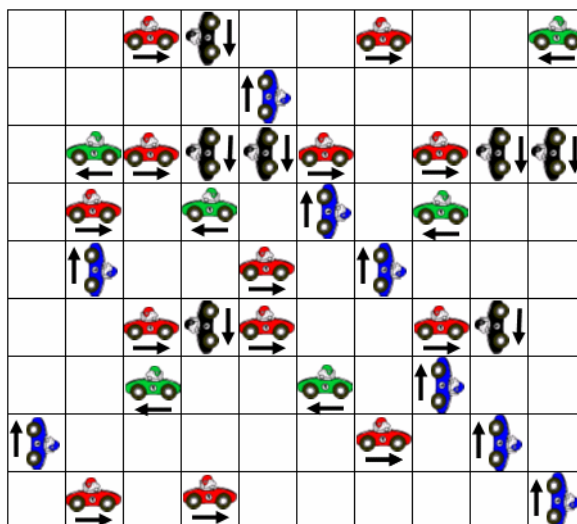
A mozgás főiránya a mozgásirány, amely a mozgás legnagyobb valószínűségét mutatja. Az autópályákon egy, a városi közlekedésben és az országutakon két mozgásirány létezik. Európában a mozgásirány balról jobbra történik, de természetesen jobbra vagy balra is fordulhatnak. A fordulás valószínűsége kisebb, mint az egyenes előrehaladás valószínűsége.

2.2. A matematikai modellek

Modellünkben egy kétsávos autópálya forgalmát vizsgáltuk. Objektumaink fő mozgásiránya balról jobbra történik, de sávot is válthatnak, vagy pl. forgalmi torlódás esetében, egyhelyben maradhatnak. Az alapmodell négyirányú mozgáslehetőségeit és az autópálya sajátosságait is figyelembe véve, objektumaink csak három irányban mozoghatnak, hátrafelé nem. Azonban ennek valószínűségét mégsem választhatjuk nullának.

Első modellünkben az 1. ábrán látható négyzetrácsos felületen történő, valószínűségi változók használatával kiegészített adaptív, decentralizált, paramétermentes mozgást (ADP) szimulációját adaptáltuk a későbbiekben megadott szabályok felhasználásával. Második modellünk pedig a Lighthill-Withmann-féle (LWM) elsőrendű folytonos közlekedési modell adaptációja, amelyet az (1) egyenlet ír le.

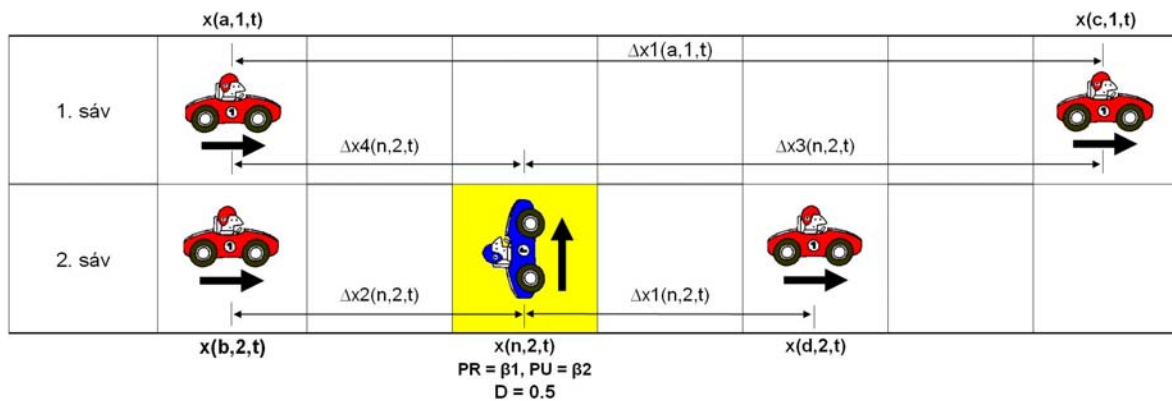
$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = s(x,t) \quad (1)$$



1. ábra: A szimuláció lehetséges mozgásirányai.

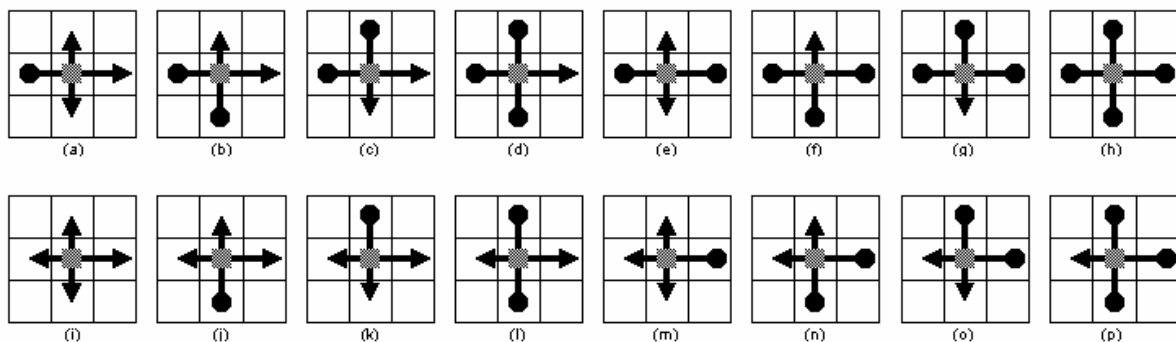
ahol ρ az objektumsűrűséget, q a forgalom, $s(x,t)$ a forrást, míg x a helyet és t az időt adja meg. Ha a pályán nincs fel-, vagy lehajtó sáv, mint jelen szimulációnkban is, akkor $s(x,t)=0$, egyébként $s(x,t) \neq 0$.

Mindkét eljárásban a 2. ábra szerinti elrendezést tekintjük a szimuláció kiindulási alapjának. Amennyiben a balról jobbra haladó irányt tekintjük a mozgás fő irányának, az egyes sávban haladó objektumok pozícióját $x(n,L,t)$ -vel jelöljük, ahol n az adott objektum sorszáma, L annak a sávnak a száma, amelyben éppen tartozkodik a t időpillanatban. L értéke jelen esetben 1 vagy 2. Az objektumok egymástól mért távolságát rendre a következő indexelésé eljárással adjuk meg. A kiválasztott, a 2. ábrán sárgával jelzett objektum előtt, ugyanabban a sávban haladó másik objektumtól mért távolságot Δx_1 -gyel, a mögötte haladót Δx_2 -vel, a másik sávban előtte haladót Δx_3 -mal, másik sávban mögötte haladót Δx_4 -gyel jelöljük. Az objektumok, haladás közben, szükség vagy saját elhatározás esetén sávot válthatnak. Az egymást követő objektumok, a sávváltások miatt, nem növekvő sorrendben követik egymást. A váltságban, amikor egy objektum sávot vált, sebességének az eddigi fő mozgásirányba mutató komponense mellett megjelenik egy erre merőleges komponense is. Az egyszerűsítés érdekében, azt tételezzük fel, hogy a sávváltás egy szimulációs időegység alatt megtörténik.



2. ábra: Mozgásirányok az autópályán.

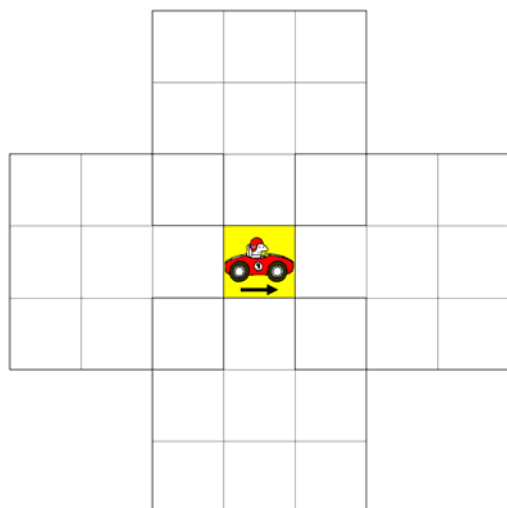
Objektumaink az ADP modell szerinti szimulációban a 2. ábrán megadott kétsávos autópályán mozognak, ezért a közlekedési szabályokat a balról jobbra mozgó objektumok szemszögéből írjuk le. Hasonló eredményeket kaphatunk más alapirányú mozgással rendelkező objektumok esetén is. Az 1. ábrán megismert mozgó objektumokhoz, a 3. ábrán bemutatott, 16 lehetséges mozgásirány tartozik.



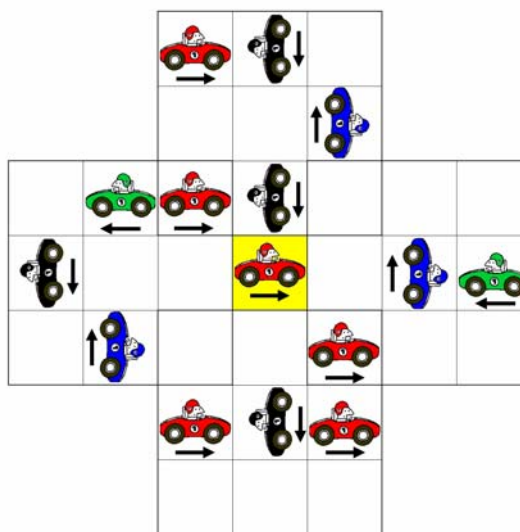
3. ábra: Sík felületen mozgó objektumok 16 lehetséges mozgásiránya.

A 3. ábra egyes mezőinek közepén lévő szürke kör azt mutatja, hogy az adott objektum mozgásait kívánjuk megfigyelni. A fekete körök a szomszédos mezők más objektumok által elfoglalt területeit jelölik, azaz a megfigyelés alatt álló objektumunk ezekre a mezőkre nem léphet. A mozgás tényleges irányának meghatározásához meg kell adnunk a mozgás fő irányát. Modellünkben az objektumok legnagyobb valószínűséggel balról jobbra mozognának, így a fekete nyilak a lehetséges lépések

irányain kívül a mozgásirány valószínűségét is mutatják. Valós környezetben, ésszerű az a feltételezés, hogy objektumaink csak nagyon ritkán mozognak hátrafelé. A 3. ábra felső sora [(a)-(h)] mutatja ezeket a lehetőségeket. Néhány esetben azonban a hátrafelé haladás is hasznos lehet. A feladatunk az lenne, hogy a lehetséges haladási irányok és objektumaink előélete alapján meghatározzuk azok új pozícióját. Ehhez a kiválasztott objektumot kerítünk körbe 3x3 négyzetrácsokkal a 4. ábrának megfelelően. Az objektumok látván a környező régiók torlódási szintjeit, a legkevésbé torlódott régió véletlenszerűen kiválasztott mezőjébe lépnek, amint azt az 5. ábra is mutatja. A kiválasztott objektumot nemcsak 3x3-as, hanem szükség esetén nagyobb mezőkkel is körbevehetjük.



4. ábra: Le, fel, jobbra, balra irányú 3x3-as négyzetrácsokkal körbevett objektum.



5. ábra: Más objektumokkal körbevett objektum.

A jobbra mozgó objektumok mozgási valószínűségeit PR, PU, PD, és PL jelöltük, ahol PR az előrehaladás (balról jobbra), PU a jobbra fordulás (fel), PD a balra fordulás (le), míg PL a hátramenet (jobbról balra) valószínűségét jelzi. A 16-féle mozgás valószínűségét leíró összefüggéseket az 1. táblázat tartalmazza.

No.	PR	PU	PD	PL
(a)	$NR/(NL + NR + NU)$	$NU/(NL+NR+NU)$	$NL/(NL + NR + NU)$	0
(b)	$NR/(NR + NU)$	$NU/(NR + NU)$	0	0
(c)	$NR/(NR + ND)$	0	$ND/(NR + ND)$	0
(d)	1	0	0	0
(e)	0	$NU/(ND + NU)$	$ND/(ND + NU)$	0
(f)	0	1	0	0
(g)	0	0	1	0
(h)	0	0	0	0
(i)	$\frac{(1-PB) \cdot NR}{(NL+NR+NU)}$	$\frac{(1-PB) \cdot NU}{(NL+NR+NU)}$	$\frac{(1-PB) \cdot ND}{(NL+NR+NU)}$	PB
(j)	$(1-PB) \cdot NR/(NR + NU)$	$(1-PB) \cdot NU/(NR + NU)$	0	PB
(k)	$(1-PB) \cdot NR/(NR + ND)$	0	$(1-PB) \cdot ND/(NR + ND)$	PB
(l)	$1 - PB$	0	0	PB
(m)	0	$(1-PB) \cdot NU/(ND+ NU)$	$(1-PB) \cdot ND/(ND+ NU)$	PB
(n)	0	$1 - PB$	0	PB
(o)	0	0	$1 - PB$	PB
(p)	0	0	0	1

1. táblázat: A lépések valószínűségi értékei

Az 1. táblázatban az NL, NR, NU és ND értékek, a kiválasztott objektumot körülvevő 3x3-as négyzettrácsok szabad mezőinek számát jelzik. Jobbra mozgó objektumok esetén a fenti szabályok alapján, az egyhelyben maradás valószínűségét a $PS = 1 - (PR+PU+PD+PL)$ összefüggés adja meg.

Az 1. táblázat adatainak értékeléséhez, első lépésben meghatározzuk a visszalépés valószínűségét (PB), amit esetünkben a PL valószínűségi változó szimbolizál. A mozgás szabályai között megadtuk, hogy objektumaink igyekeznek elkerülni a zsúfolt régiókat és a legkevésbé forgalmas régiók felé indulnak el, úgy hogy a hátrafelé történő mozgást, ha csak lehet, kerülje el. Más szavakkal, a jobbra mozgó objektumok mozgási valószínűsége a szomszédos 3x3-as területekben található szabad mezők számával arányos. A 3. ábrán látható (a)-(h) lépések esetén, a baloldali mező foglaltsága miatt nem léphetünk erre a mezőre. Ezekben az esetekben csak jobbra, fel vagy le irányokba léphetünk NR, NU, és ND valószínűségi aránnyal. Az (i)-(p) lépések esetén a baloldali mező nem foglalt, így ezekben az esetekben balra PB valószínűséggel léphetünk, és a többi lehetséges mozgásirányba NR, NU, és ND valószínűségi aránnyal. Ebből következően a jobbra (előre) mozgó objektumok balra (hátra) történő mozgásának valószínűsége NL/K^2 , ahol NL a baloldali régió szabad mezőinek a száma, míg K a kiválasztott objektumok körülvevő négyzetek oldalainak a mérete. Vagyis a jobbra, fenn és lenn elhelyezkedő régiók foglalt mezőknek arányát az $1-(NR + NU + ND + 1)/(3K^2+1)$ kifejezés mutatja. A +1 érték arra az esetre utal, amikor az objektum helyben marad. A balra (hátra) lépés valószínűségi mutatója ezen értékekből már könnyen előállítható a (2) összefüggéssel

$$PB = P(\text{Nem történik mozgás se jobbra, se fel, se le}) * P(\text{balra lépés})$$

$$PB = \left(1 - \frac{NR+NU+ND+1}{3K^2+1}\right) \cdot \frac{NL}{K^2} \quad (2)$$

Ez a számítási eljárás azonban nem veszi figyelembe a kiválasztott objektum tervezett haladási irányát, pedig a mozgás valószínűsége függ a tervezett haladási iránytól. A (b) és (c) esetben például a következőképpen vegyük figyelembe a haladási iránynak a mozgás valószínűségére gyakorolt hatását: (b): $PR_{drift}=D+(1-D)/2$ és $PU_{drift}=(1-D)/2$ valamint (c): $PR_{drift}=D+(1-D)/2$ és $PD_{drift}=(1-D)/2$, ahol D valószínűségi változó az irányítottság erősségét jelzi. Ha nincs választási lehetőség, mint például az (f) esetben, akkor a $P_{drift}=1$. Folyamatos mozgás esetén pedig a $PS_{drift}=0$. Az 1. táblázat adatait figyelembe véve 2. sávban haladók (b) és (c) egyenletei a következőképpen (3), (4) alakulnak:

$$PR = \frac{NR}{(NR + NU)} \rightarrow PR = \frac{NR \cdot PR_{drift}}{(NR \cdot PR_{drift} + NU \cdot PU_{drift})} \quad (3)$$

$$PU = \frac{NU}{(NR + NU)} \rightarrow PU = \frac{NU \cdot PU_{drift}}{(NR \cdot PR_{drift} + NU \cdot PU_{drift})} \quad (4)$$

A 2. ábrán látható példa esetén a sárgával kiválasztott objektumot más objektumok veszik körül. Ez esetben $D=0.5$ és $K=3$ feltételek mellett $NR = 5$, $NU = 3$, $ND = 0$ és $NL = 4$. A kiválasztott objektum mozgásirány valószínűségi mutatói tehát az 1. táblázat (b) sorának egyenletei alapján $PR_{drift}=0.75$ és $PU_{drift}=0.25$ értékek mellett $PR=0.833$ és $PU=0.167$.

Látható, hogy az ADP eljárásban, a mozgó objektumok PL, PR, PU, és PD mozgás valószínűség értékek egy adott időpillanatban, a vizsgált régiók forgalmi szintjétől függenek. A mozgó objektumok mozgási valószínűségei a közlekedési feltételektől időben változó módon függenek. Minden egyes mozgó objektum önmagában, decentralizált módon dönt a mozgásáról, csak az őt körülvevő régiók lokális torlódási adataitól függően. Modellünkben tehát nincs olyan központi irányító rendszer, amely az objektumok mozgását szabályozná. Ezt a következtetést abból a tényből is levonhatjuk, hogy a közlekedési szabályok paramétermentesek. Így arra sincs szükség, hogy speciális paraméter értékeket válasszunk. A modellünkben tehát a PL, PR, PU, és PD mozgás valószínűségi változók előredefiniált fix értékek minden mozgó objektumra, minden időpillanatban és csak a tervezett mozgásirányon alapulnak, függetlenül a forgalom mértékére.

A második, az LWM, eljárásban szintén a balról jobbra történő mozgás jelenti a fő mozgásirányt. E modell szerint az objektumok egy hosszú, homogén mozgáspálya mentén mozognak. Ha a pályán nincs fel-, vagy lehajtó sáv, akkor (1) egyenlet jobb oldala $s(x,t)=0$, egyébként $s(x,t) \neq 0$. Ha v -vel jelöljük az LWM modell jelenlegi fel- és lehajtósáv nélküli vizsgált területén az átlagsebességet, akkor a forgalom-sűrűség függvényt a $q = \rho \cdot v$ összefüggéssel adhatjuk meg, ami azt jelenti, hogy létezik összefüggés a sebesség és a sűrűség között $v = v(\rho)$. Több tanulmány is foglalkozott az objektumok sebességével [12,13,14]. Bando és munkatársai vezették be objektumkövető modelljüket optimális sebességmodell néven, amely meghatározta a biztonságos követési sebességet az előlévő objektumtól mért távolság függvényében. Jiang bemutatott egy sebesség különbségen alapuló modellt, amely figyelembe veszi a mind a távolságot, mind a relatív sebességet, két egymást követő mozgó objektum között. Ezek a modellek azonban egy közlekedési sávra koncentráltak. Legalább két sáv esetében, nem lehet figyelmen kívül hagyni a sávok között haladó objektumok kölcsönhatását. A 2. ábrán látható, hogy pl. a 1. sávban haladó objektumoknak nemcsak az 1. sávban haladó objektumok egymástól mért távolságára vagy két egymást követő objektum relatív sebességére van hatással, hanem a 2. sávban haladó objektumok paramétereire is. Ezért egy több sávra kiterjesztett módosított modellt kell alkalmaznunk, hogy több sávban is meg tudjuk vizsgálni az objektumaink mozgását. Ehhez először határozzuk meg, hogy milyen változóktól függ a kiválasztott objektum sebessége (5).

$$\frac{dX(n,L,t + \tau)}{dt} = V_L (\Delta x1(n,L,t), \Delta x3(n,L,t), \Delta v1(n,L,t)), \quad (5)$$

ahol $\Delta x1(n,L,t)$ és $\Delta v1(n,L,t)$ a köztes távolság és a relatív sebesség az L sávban mozgó kiválasztott n -dik és az előtte ugyanabban a sávban mozgó objektum között a t időpillanatban. Ezenkívül a $\Delta x3(n,L,t)$ a kiválasztott n -dik objektum és a másik sávban a hozzá legközelebb eső mozgó objektum távolsága (laterális távolság) a t időpillanatban, valamint τ a szimulációs lépésköz ideje. Mivel az 1. és a 2. sáv optimális sebessége különbözik, többnyire $v1opt > v2opt$, a sáv váltást általában akkor kell kezdeményezni, amikor egy szimulációs lépésköznyi idő elegendő az optimális sebesség eléréséhez. Ellenkező esetben a követő ($\Delta x4$) objektumot kényszerhelyzetbe hozhatjuk. Ha az (5) összefüggés baloldalát Taylor-sorának első két tagjával közelítve a következő összefüggéshez (6) juthatunk:

$$\frac{dX(n,L,t + \tau)}{dt} = \frac{d X(n,L,t)}{dt} + \tau \cdot \frac{d^2 X(n,L,t)}{dt^2} \quad (6)$$

Definiáljuk a kiválasztott sáv optimális sebességét (7), mint a köztes távolság által indukált komponens és a sebesség által indukált komponens lineáris kombinációját.

$$V_L(\Delta x1(n, L, t), \Delta x3(n, L, t), \Delta v1(n, L, t)) = V_L(\Delta x1(n, L, t), \Delta x3(n, L, t)) + \lambda_L \cdot \Delta v1(n, L, t) \quad (7)$$

ahol $\lambda_L \in (0, 1)$ egy időtől, sebességtől és pozíciótól független, a relatív sebességhez rendelt érzékenységi faktor. Feltételezzük, hogy az 1. sávban (gyorsabb sáv) haladó objektumok számára a külső körülmények kedvezőbbek, mint a 2. sávban (lassabb sáv) haladóké, vagyis $\lambda_1 > \lambda_2$.

Helyettesítsük be a (2) és (3)-ast az (1) egyenletbe, amiből azt kapjuk (8), hogy

$$\frac{d^2 X(n,L,t)}{dt^2} = \alpha_L \cdot (V_L(\Delta x_1(n, L, t), \Delta x_3(n, L, t)) - \frac{d X(n,L,t)}{dt}) + k_L \cdot \Delta v_1(n, L, t) \quad (8)$$

ahol $\alpha_L = 1/\tau_L$ a objektum érzékenységet mutatja az optimális és a jelenlegi sebességkülönbségre az egyes sávban míg a $k_L = \lambda_L/\tau_L$ a $\Delta v_1(n, L, t)$ által kiváltott válasz érzékenységi együtthatója.

A (8) egyenlet megoldásával a következő sávváltási szabályokhoz (9) juthatunk.

$$V_L(\Delta x_1(n, L, t), \Delta x_3(n, L, t)) = 0.5 \cdot V_{Lmax} \cdot (\tanh(\beta_1 \cdot \Delta x_1(n, L, t) + \beta_2 \cdot \Delta x_3(n, L, t) - h_{3L}) + \tanh(h_{3L})) \quad (9)$$

ahol β_1 és β_2 $\Delta x_1(n, L, t)$ illetve $\Delta x_3(n, L, t)$ súlyai, $\beta_1 + \beta_2 = 1$ és $\beta_1 \geq \beta_2$ feltételek mellett, valamint h_{3L} a Δx_3 távolsághoz tartozó biztonsági távolságot, V_{Lmax} az L sávhoz tartozó maximális sebességet jelöli. Mivel a β_1 és β_2 értékek hatásukban megegyeznek a ADP eljárás valószínűségi változóival, ezért a szimuláció során ezen értékek megfeleltethetők egymásnak.

A fenti összefüggések szerint a (8)-at diszkrétizálva a következő mozgásegyenlethez (10) jutunk:

$$X(n,L,t+2\tau) = X(n,L,t+\tau) + \tau \cdot V_L(\Delta x_1(n,L,t), \Delta x_3(n,L,t)) + \lambda_L \cdot \tau \cdot (X(n,L,t+\tau) - X(n,L,t)) \quad (10)$$

3. Szimuláció

A szimuláció során egy kétsávos autópálya 1500 egység hosszú szakaszát vizsgáltuk meg, 180 km/h maximális megengedett sebesség mellett. A közlekedési szabályokat a következőképpen definiáltuk: az i. objektum, a vizsgált szakasz L-edik sávjára, a t-edik időpillanatban lép be $v_i(t)$ sebességgel. A jobbra haladó objektum lehetséges mozgásirányai az ADP eljárásban, a 2. ábrával összhangban, a (b), (c), (d), (f), (g), (h) és (p), míg az LWM eljárásban a (10) szerint járunk el. Ez azt jelenti, hogy objektumunk mehet előre, vagy fordulhat akár jobbra, akár balra, azaz sávot válthat, vagy szükség esetén várakozhat és tolathat is.

Modellünkben megvizsgáljuk, hogy a két eljárás mennyire dolgozik összhangban. Az egyik ismeretében következtethetünk-e a másik állapotaira. Amennyiben a két eljárás nem tekinthető azonosnak, akkor összehasonlítható részfolyamatokat keresünk az eltérő szimulációs eljárásokban, azzal a céllal, hogy megállapítsuk mennyi ideig tekinthető párhuzamos lefolyásúnak a két eljárás.

Szimulációs programunk szekvenciális frissítési szabályokat alkalmaz. A mozgó objektumok saját, 1-től n-ig tartó sorszámaikkal, időbélyegeikkel és sebesség értékeikkel adottak, ahol n a szimulációban résztvevő mozgó objektumok száma. Az n maximális értéke, átlagosan négy egység hosszúnak feltételezett objektumok esetén, 750. Minden egyes időlépésben, minden mozgó objektumot egyszer frissítünk. Amint azt a 2.2. fejezetben láttuk a mozgási irány valószínűsége a mozgó objektum irányítottságától függ, azaz a jobbra mozgó objektumok mozgási valószínűségi értékei balról jobbra történő mozgás során nagyobbak, mint fordulás esetére, amit a $D=0.5$ értékkel adtunk meg. Mivel az LWM eljárás két egymást követő időponthoz tartozó értéket használ, ezért az ADP eljárás kezdeti és első időpontbeli értékei lettek az LWM eljárás kiinduló értékei.

Minden egyes t időpillanatban, minden egyes $O(i,L)$ mozgó objektum eldönti, hogy hová akar lépni, összhangban mozgási valószínűségi változókkal és a szomszédos régiók illetve a leíró egyenlet lehetőségeivel. Ez a megoldási eljárás konfliktushelyzethez vezethet abban az esetben, ha egynél több mozgó objektum akar ugyanarra a mezőre lépni. Amennyiben a konfliktushelyzet feloldható, úgy új mezők kerülnek kiszámításra, amennyiben a konfliktushelyzet nem feloldható, úgy baleset történik, blokkolva ezzel az adott sáv forgalmát, nullára csökkentve az ütköző objektumok sebességét.

A szimulációt $\tau=1$ lépésközzel 20 000 időlépésig futtattuk. Az adatok értékelését a $10\,000 < t \leq 20\,000$ közötti időintervallumban végeztük el. Az objektumsűrűséget kilenc lépésben 0,1 lépésközzel változtattuk 0,1 és 0,9 között. Egy objektumsűrűséghez rendelt szimuláció eredményét 7 különböző kezdeti feltételekkel adott szimuláció eredményének átlagából kaptunk.

4. Eredmények

A szimuláció során két kérdésre kerestük a választ. Egyrészt tudni szeretnénk volna, hogy a két szimuláció milyen pontosan követi egymást illetve mekkora az az időtartomány, amelyben a két szimuláció még egyenértékűnek tekinthető. A szimuláció során ugyanazokkal a kezdőértékekkel futtattuk le a két eljárást. Az eredményeket a 2. táblázat mutatja. A két, azonos feltételekkel indított, szimuláció eljárás eredménye egyetlen esetben sem egyezett meg a 63 futtatás során, ami azt mutatja, hogy a két eljárás nem felel meg egymásnak, vagyis egymás ellenőrzésére nem használható. Bár ugyanazokkal a kezdeti feltételekkel indultak az egyes szimulációk, mégis alapvető különbségek szerepelnek a két realizált módszerben. Míg a valószínűségi változók és ezen keresztül az új pozíciók meghatározásához az ADP eljárásban csak az előző időpontbeli értékek ismeretére volt szükségünk, addig az LWM eljárásban a két utolsó időponthoz tartozó értékek szükségesek. Ez magyarázza a két eljárás gyors divergenciáját. A szimuláció alatt, a tényleges értékeléshez tartozó 10 000. lépés után, több esetben kaptunk azonos mintákat, igaz ezek közül egyik sem ugyanazokat a mozgó objektumokat tartalmazta.

Forgalom sűrűség	Végállapot egyezés	Minta egyezés	Egyező lépésszám
0,1	0	23700	3,194
0,2	0	35736	2,892
0,3	0	113014	3,987
0,4	0	152994	3,132
0,5	0	148642	3,365
0,6	0	120616	3,169
0,7	0	219324	2,835
0,8	0	167494	3,394
0,9	0	372440	3,426

2. Táblázat: Mérési eredmények

Mintaegyezésnek azokat az eseteket tekintettük, amelyben egy kiválasztott mozgó objektumot körülvevő objektumok sebességei és egymástól való távolságai két egymást követő szimulációs lépésben megegyeztek. A szimuláció során 1 méteres lépésközzel használva, a következő lépés eredményét akkor mondtuk megegyezőnek a két eljárás esetében, ha az új pozíciók legfeljebb két lépésközzel tértek el egymástól. A 63 futtatás eredményéből az következett, hogy azonos kiindulási mintát használva átlagosan 3,27 lépésig egyeztek meg a szimuláció eredményei.

5. Következtetések

A mai képfeldolgozási eljárásokat figyelembe véve, amely során másodpercenként átlagosan 25 képet készítve a megfigyelt környezetről, elmondhatjuk, hogy felvételeinken 180 km/h azaz 50 m/s sebesség mellett is csak 2 méternyi utat tesznek meg objektumaink egy-egy időintervallum alatt. Ez azt jelenti, hogy megfelelően gyors képszegmentációs technika alkalmazása mellett 2-3 képfeldolgozási lépés kihagyása után fél-egy objektum hosszúságnyi eltéréseken belül megtalálhatók a keresett objektumok. Megfelelő sebességű a képfeldolgozás, ha periódusideje kisebb, mint egy átlagosan 4 méter hosszú objektum periódusidő alatti elmozdulása. Más szavakkal ez azt jelenti, hogy ha a két egymást követő képet egymásra másolnánk, akkor a vizsgált mozgó objektum két időpillanatbeli képe részlegesen fedné egymást. Figyelembe véve azt a szimulációs eredményt, hogy a két eljárás azonos kezdeti

minták esetén átlagosan három szimulációs lépésig közel egyformának tekinthető, azt jelenti, hogy nagyobb sebességek esetén egy-két, kisebb sebességek esetén akár két-három képszegmentáció is kihagyható, megnövelve ezzel az egy kép elemzésére fordítható időt. A két, eltérő elméleti alapokon működő szimulációs eljárás eredményképpen tehát elmondható, hogy az elméleti 40 ms-nyi képfeldolgozási idő a valóságban akár 120 ms-nyira is növelhető.

6. Irodalomjegyzék

- [1] M. MURAMATSU, T. NAGATANI Jamming transition in two-dimensional pedestrian traffic. *Physica A* 275 (2000) pp. 281.
- [2] S. MANICCAM, Effects of back step and update rule on congestion of mobile objects. *Physica A* 346 (2005) pp. 631–650.
- [3] S. MANICCAM, Adaptive decentralized congestion avoidance in two-dimensional traffic. *Physica A* 363 (2006) pp. 512–526.
- [4] B. L. KEYFITZ, Hold that light! Modelling of traffic flow by differential equations, Rice University Conference, 1998
- [5] H. J. LEE, H. W. LEE, D. KIM, Dynamic States of a Continuum Traffic Equation with On-Ramp, *Cond. Mat/9903036 v1* (1999)
- [6] D. HELBING, A. HENNECKE, M. TREIBER, Phase Diagram of Traffic States in the Presence of Inhomogeneities, *Physical Review Letters* Vol. 82 (1999), pp.4360-4363
- [7] V. POPKOV, L. SANTEN, A. SCHADSCHNEIDER, G. SCHÜTZ, Boundary-induced phase transitions in traffic flow, *Cond. Mat/ 0002169 v1* (2000)
- [8] M. MURAMATSU, T. NAGATANI, Jamming transition of pedestrian traffic at crossing with open boundaries. *Physica A* 286 (2000) pp.377.
- [9] D. J. DAILEY, F. CATHEY, S. PUMRIN, An Algorithm to Estimate Mean Traffic Speed Using Uncalibrated Cameras. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, vol. 1, no. 2, June 2000, pp.98
- [10] A.L. SCHOUTE, P. J. BOUWENS, Deadlock-free traffic control with geometrical critical sections. *Conference Computing Science in the Netherlands*, Nov 1994, Utrecht Stichting Mathematisch Centrum, Amsterdam 1994, pp.260
- [11] R. JIANG, Q. WU, Z. ZHU, A new continuum model for traffic flow and numerical tests. *Transportation Research-B* 36, 405–419 (2002)
- [12] T. TANG, H HUANG, S. WONG, R. JIANG, Lane changing analysis for two-lane traffic flow. *Acta Mech Sin* 23 (2007) pp.49
- [13] H. HUANG, T. TANG, Z. GAO, Continuum modeling for two-lane traffic flow. *Acta Mech Sinica* 22 (2006) pp.131
- [14] M. BANDO, K. HASEBE, A. NAKAYAMA, A. SHIBATA, Y. SUGIYAMA, Dynamic model of traffic congestion and numerical simulation. *Phys. Rev. E* 51, 1035–1042 (1995)