ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: TRANSPORT z.41 Nr kol. 1491

Tomasz CIMR

MODELOWANIE STANÓW DYNAMICZNYCH W SYSTEMIE SYMULACJI RUCHU POJAZDÓW Z ZASTOSOWANIEM AUTOMATÓW KOMÓRKOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono model automatu komórkowego opisujący ruchu drogowy. Na podstawie tego modelu matematycznego wyprowadzane są główne parametry charakteryzujące właściwości potoku ruchu poprzez analizę wykresu droga-czas oraz fundamentalnego wykresu ruchu. Porównano rzeczywisty rozkład ruchu oraz rezultaty symulacji bazującej na modelu Nagela-Schreckenberga.

THE DYNAMIC STATES MODELING IN SIMULATION SYSTEM OF VEHICLES TRAFFIC BY CELLULAR AUTOMATA IMPLEMENTATION

Summary. The paper presents the formal model of vehicles flow, where a cellular automata theory has been applied. This model allows to determine the main road traffic coordinates describing the traffic diagrams and space-time plots. The modeling results have been related to simulation experiments based on Nagel-Schreckenberg idea.

1. WPROWADZENIE

Rozwój motoryzacji oraz zwiększenie mobilności społeczeństwa powodują, że znaczna część dróg (w szczególności na terenach o wysokim zaludnieniu) eksploatowana jest na granicy ich przepustowości. Problemy z płynnością ruchu wynikają z niedoskonałości infrastruktury drogowej oraz częstego zwalniania i zatrzymywania się samochodów. W celu poprawy tej trudnej sytuacji potrzebna jest wszechstronna ocena warunków ruchu, analiza przyczyn powstawania zakłóceń i optymalne sterowanie ruchem.

Dawne metody analizy ruchu drogowego opierały się na modelach statystycznych, które w dużym stopniu ograniczały efektywność prognozowania ruchu. Modele te nie brały pod

uwagę wielu czynników zmieniających się w czasie i w przestrzeni, takich jak stopień wzajemnego oddziaływania między pojazdami.

Rozwój i udoskonalanie metod matematycznych oraz wzrost mocy obliczeniowej komputerów radykalnie zmieniły metody analizy ruchu drogowego.

W latach pięćdziesiątych Webster i Von Neuman zapoczątkowali badania nad modelami matematycznymi procesów sterowania ruchem za pomocą metod symulacji komputerowej. Podstawową zaletą w modelowaniu dynamiki systemów transportowych, przy udziale symulacji komputerowej, jest możliwość badania skomplikowanych stanów i procesów ruchu drogowego, których nie można jednoznacznie rozwiązać analitycznie.

Z punktu widzenia wydajności obliczeniowej komputerów i czasochłonności programowania, modele potoków ruchu powinny opisywać istotne (w jak najprostszy sposób) aspekty dynamiki potoków ruchu. Obecnie dostępnych jest kilkanaście narzędzi symulacji (TrafNetSim, Texas, Sim Traffic, Transyt), które mogą być rozróżniane poprzez ich przestrzenny i czasowy rozkład lub przez ich szczegółowość w opisie ruchu pojazdów.

Dla szybkich systemów symulacji dużych sieci transportowych, obejmujących różne rodzaje dróg i skrzyżowań, powinien być stosowany model kompromisowy pomiędzy czasem symulacji a mocą obliczeniową.

Takie wymogi spełnia model sterowania oparty na teorii automatu komórkowego [3].

2. AUTOMATY KOMÓRKOWE

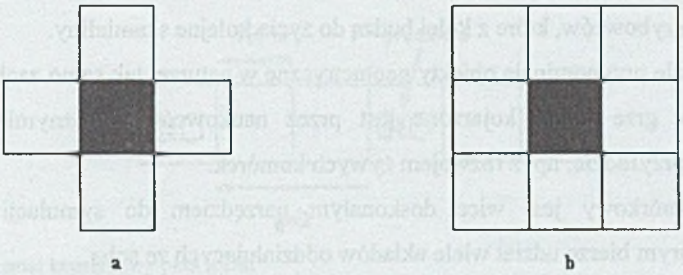
Automat komórkowy jest modelem matematycznym, realizującym procesy dynamiczne w dyskretnym czasie i przestrzeni. Automat składa się z komórek, które mogą przybierać ograniczoną liczbę stanów. Stany komórek zmieniają się według odpowiednich reguł. Stany każdej z komórek aktualizowane są synchronicznie krok po kroku.

Automat komórkowy składa się z trzech obiektów matematycznych, to znaczy [7]:

- sieć komórek $\{i\}$ przestrzeni D-wymiarowej,
- zbiór $\{s_i\}$ stanów pojedynczej komórki, zwykle ten sam dla wszystkich komórek, zawierający k elementów,
- reguła F określająca stan komórki w chwili t+1 w zależności od stanu w chwili t-tej komórki i komórek ją otaczających $s_i(t+1)=F(\{s_j\}), j \in O(i)$ gdzie $O(i)$ jest otoczeniem i-tej komórki.

Definicja ta dotyczy automatu komórkowego deterministycznego. Gdy dodatkowo funkcja F zależy od zmiennej losowej, to taki automat nazywamy probabilistycznym. Automaty możemy klasyfikować na podstawie obserwacji. Wyróżniamy automaty uporządkowane lub nieuporządkowane. Najważniejszymi parametrami automatu komórkowego są: wymiar D sieci, liczba stanów k pojedynczej komórki oraz jej otoczenie O(i).

Najprostszą notacją określającą rodzinę automatów jest podanie dwóch liczb: (k,r). Gdzie r jest to promień otoczenia liczony w komórkach. Ta notacja najczęściej jest stosowana dla automatów jednowymiarowych (D=1), ponieważ nie podaje ona wymiaru sieci. Dlatego przykładowo dla sieci dwuwymiarowej (D=2) nie wiemy, czy otoczenie jest otoczeniem von Neumanna czy Moore'a (rys.1).



Rys. 1. Otoczenie: a) von Neumanna, b) Moore'a
Fig. 1. Neighborhood: a) von Neumann, b) Moore

Innymi parametrami opisującymi automaty są: liczba iteracji, liczba reguł, warunki początkowe, lambda λ. Aktywność λ jest to parametr określający zdolność automatu do generowania danego stanu.

Za twórcę automatów komórkowych uważa się Węgra Janosa von Neumanna (lata 50.). Część z jego wszechstronnych badań przyczyniła się do rozwoju informatyki. Jednym z jego osiągnięć w tej dziedzinie jest opracowanie do dzisiaj wykorzystywanego modelu architektury komputera z cyklem maszynowym i programem, który wraz z danymi przechowywany jest w pamięci.

Rozważane w tej pracy pojęcie automatu komórkowego jest również pomysłem von Neumanna. Z inspiracji lwowskiego matematyka Stanisława Ulama von Neumann wprowadził do swego modelu dyskretny czas i przestrzeń.

Najsłynniejszym automatem jest opracowana w 1970 roku przez Johna Conwaya matematyczna gra "Życie. Jest ona zdefiniowana na dwuwymiarowej sieci kwadratowej

(D=2). Można sobie tę sieć wyobrażać jako papier w kratkę. Każda kratka to pojedyncza komórka. Komórka może być żywa lub martwa (wypełniona lub pusta), tzn. zbiór stanów każdej komórki k=2. Inaczej mówiąc, komórka jest "żywa" (1) lub "martwa" (0). Otoczeniem i -tej komórki w automacie *Life* jest *otoczenie Moore'a*.

Reguła F automatu Life jest następująca: jeśli w otoczeniu komórki (nie licząc jej samej) są w czasie *t* trzy komórki żywe, to w czasie *t+1* ta komórka jest żywa (F=1). Jeżeli w jej otoczeniu w czasie t są dwie komórki żywe, a ona sama również jest żywa, to pozostaje żywa również w czasie *t+1*(F=0). W pozostałych przypadkach jest ona martwa w czasie *t+1*(F=0). Na podstawie tej reguły tworzone są różnorodne formy graficzne, zmieniające się synchronicznie krok po kroku.

Formy w automacie Życie obumierają, stają się formami nieruchomymi - skamielinami lub ruchomymi - szybowcami. Zderzenie szybowca ze skamienieliną może prowadzić do emisji kolejnych szybowców, które z kolei budzą do życia kolejne skamieliny.

Tak jak fraktale przypominają obiekty geometryczne w naturze, tak samo zachowanie się różnych form w grze Życie kojarzone jest przez naukowców z różnymi procesami zachodzącymi w przyrodzie, np. z rozwojem żywych komórek.

Automat komórkowy jest więc doskonałym narzędziem do symulacji procesów fizycznych, w którym bierze udział wiele układów oddziałujących ze sobą.

Oprócz takich nauk, jak fizyka, biologia, chemia i ekonomia, automaty komórkowe zaczęto stosować w transporcie do symulacji komputerowych ruchu pojazdów na autostradach i w centrach miast.

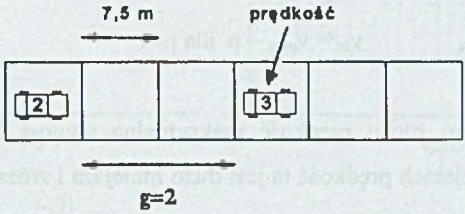
Ruch drogowy może być rozpatrywany jako system samoorganizujący się. Komponenty tego systemu charakteryzują się spójnym zachowaniem i powiązaniem pomimo braku centralnego sterowania. Steen Rasmussen, zajmujący się inżynierią ruchu w Los Alamos National Laboratory (USA), uważa, że ruchu drogowy można uważać za system zróżnicowanych elementów rozproszonych w przestrzeni: „Elementy, które współgrają ze sobą, przypominają układy biologiczne. Są to dynamiczne struktury hierarchiczne z elementami sterującymi na wielu różnych poziomach, takie jak organelle, komórki, tkanki, istoty ludzkie".

Automaty komórkowe są najlepszym narzędziem pozwalającym na łączenie dużej liczby elementów oraz poziomów organizacyjnych w model symulacyjny działający dynamicznie w czasie rzeczywistym.

3. MODEL SYSTEMU TRANSPORTOWEGO

Pomiędzy licznymi automatami komórkowymi, model Nagela - Schreckenberga[1] jest najbardziej odpowiedni do wymagań stawianych symulacjom komputerowym ruchu drogowego. Model ten jest zdolny do odtwarzania charakterystycznych właściwości rzeczywistego ruchu drogowego, tak np. czaso-przestrzennego kształtowania się zatorów w ruchu ulicznym i relacji pomiędzy potokami.

W modelu ulica została podzielona na komórki 7,5 metrowe. Każdy pojazd posiada odpowiednią prędkość, która jest ograniczona przez drogę lub przez maksymalną prędkość pojazdu (Rys.2).



Rys. 2. Schemat komórkowy pasa ruchu
Fig. 2. Cellular road model scheme

Komórka jest albo pusta albo zajęta przez jeden pojazd (i) o prędkości $v(i) = (0, v_{max})$ $[v(i)=(0,5)]$.

Prędkość mierzona jest jako liczba komórek przebyta przez pojazd w jednostce czasu. Ogólne cechy tego modelu ruchu to:

- pojazdy poruszają się na pasie tylko w jednym kierunku,
- nowe pojazdy pojawiają się tylko w punktach granicznych modelu,
- każdy pojazd ma ograniczoną ilość miejsca w postaci komórek,
- pojazdy nie mogą przejeżdżać przez siebie.

Ruch pojazdu determinowany jest regułą składającą się z trzech kroków. Dla każdego kroku czasowego reguły 1,2 i 3 stosowane są dla wszystkich pojazdów równocześnie:

1) bezkolizyjne przyspieszenie: $v_1(i) = \min[v(i) + 1, v_{max}, g(i)]$,

[1] Kai Nagel, Los Alamos National Laboratory, Michael Schreckenberg, Universitat Duisburg, Germany.

2) losowość o prawdopodobieństwie p: $v_2(i) = \max[v1(i)-1, 0]$,

3) ruch: $x(i) \leftarrow x(i) + v_2(i)$.

Reguła pierwsza oznacza optymalną strategię prowadzenia pojazdu tzn. kierowca przyspiesza do maksymalnej prędkości lub hamuje, gdy luka g nie jest zachowana. Luka g(i) oznacza liczbę pustych komórek pomiędzy dwoma pojazdami. To oznacza, że krok pierwszy modelu jest całkowicie deterministyczny, tj. stany ustalone zależą jedynie od warunków początkowych.

W kroku drugim w celu realistycznego opisu potoków ruchu wprowadzono losowość. Parametr p bierze pod uwagę takie sytuacje, jak szybkie hamowanie czy opóźnienia w przyspieszaniu. Prędkość jest zmniejszana o 1 przy prawdopodobieństwie. W kroku trzecim pojazd przesuwa się z ustaloną prędkością v(i). Średnia ustalona prędkość pojazdów dla ruchu swobodnego wynosi :

$$v_{śr} = v_{max} - p \quad \text{dla } p \neq 1 \tag{1}$$

Na drogach szybkiego ruchu prędkość maksymalna wynosi średnio 120/130 km/h. Natomiast na drogach miejskich prędkość ta jest dużo mniejsza i zróżnicowana. Maksymalną prędkość v_{max} wyznaczamy ze wzoru:

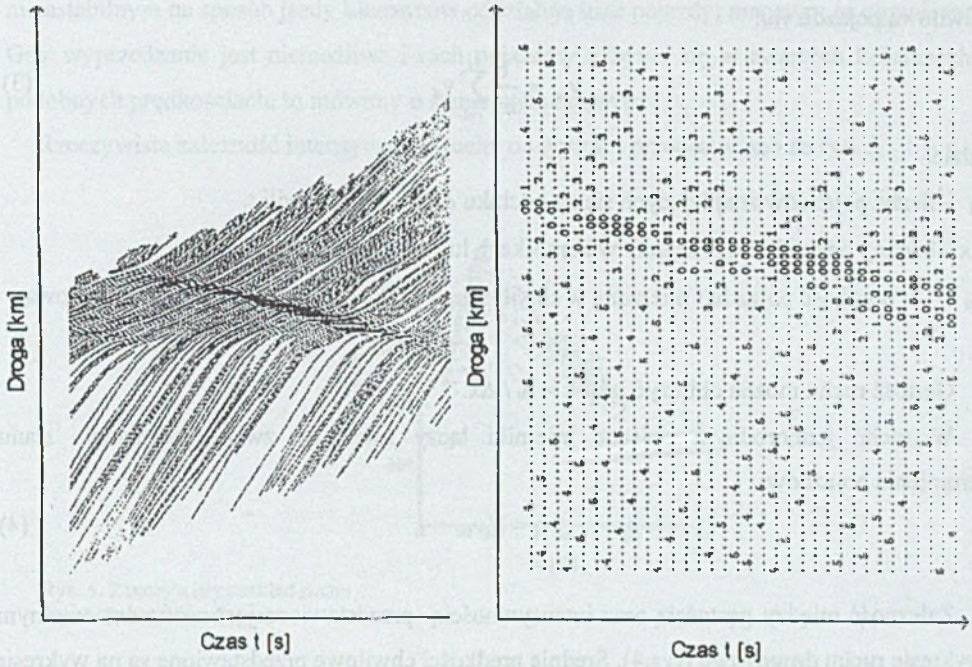
$$v_{max} = [(v^{rz}_{max} / L) + 0,5 + p] \tag{2}$$

gdzie:

v^{rz}_{max} [m/s] - rzeczywista prędkość maksymalna na danym odcinku drogi,

L [m] - szerokość komórki (L=7,5m.).

Badanie zachowania się automatu komórkowego można przeprowadzić na podstawie analizy trajektorii pojazdów na wykresie droga-czas (rys.3).



A B

Rys.3. Przykład trajektorii na wykresie droga-czas: a) rzeczywisty rozkład ruchu, b) wynik symulacji zastosowaniem automatu komórkowego wraz z prędkościami

Fig. 3. Trajectories on time vs. distance plots: a) real traffic, b) simulation results (with velocity)

Reguły automatu komórkowego są odpowiednio dostosowywane do warunków geometrycznych (skrzyżowania, liczba pasów), ruchowych (manewry pojazdów, stopień obciążenia ruchu) oraz rodzaju sterowania (skrzyżowania z sygnalizacją świetlną i bez niej).

4. PARAMETRY SYMULACJI RUCHU DROGOWEGO

Ponieważ automat komórkowy rozważa zachowanie każdego indywidualnego pojazdu (kierowcy), dostępnych jest wiele informacji odnośnie do ruchu i otoczenia każdego pojazdu. Miarami stanów strumienia ruchu są: q - intensywność ruchu [P/s], prędkość pojazdu v i gęstość k.

Intensywność ruchu jest to liczba pojazdów przejeżdżających określony przekrój drogi w jednostce czasu [P/s], przy czym q = Q / 3600, gdzie Q jest to natężenie ruchu [P/h].

Średnią prędkość pojazdów możemy wyznaczyć ze wzoru 3.1, a średnią prędkość chwilową pojazdu $v_{tśr}$:

$$v_{tsr} = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} v_{ti} \tag{3}$$

gdzie:

n_t - liczba pojazdów znajdujących się na odcinku Δx w danej chwili t,

Δx - badany odcinek drogi liczony w komórkach lub metrach,

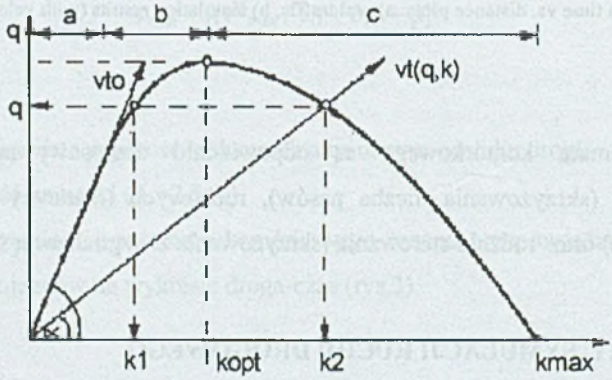
v_{ti} - prędkość pojazdu i mierzona w chwili t na odcinku Δx zwana prędkością chwilową.

Gęstość ruchu można obliczyć jako $k = n_t / \Delta x$.

W ruchu jednorodnym opisane mierniki łączy zależność zwana równaniem stanu strumienia pojazdów:

$$q = k\, v_{tśr} \tag{4}$$

Zależność między gęstością oraz intensywnością przedstawiona jest na fundamentalnym wykresie ruchu drogowego (rys.4). Średnie prędkości chwilowe przedstawione są na wykresie jako rodzina prostych, wychodzących z początku układu współrzędnych.

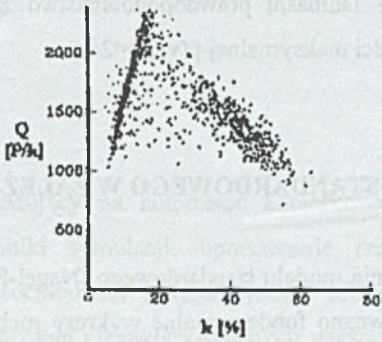


Rys. 4. Zależność między natężeniem i gęstością ruchu. Stany a) swobodny, b) metastabilny, c) wymuszony
Fig. 4. Fundamental diagram. a) free, b) metastable, c) affected, states

Wykres określa stopień wzajemnego oddziaływania między pojazdami. Możemy wyróżnić trzy stany ruchu. Stan swobodny występuje przy małym natężeniu ruchu, gdy kierowcy mogą

swobodnie zmieniać prędkość jazdy oraz pasy ruchu; $v_{śr}(k,q)$ = const. W stanie metastabilnym na sposób jazdy kierowców oddziałują inne pojazdy; manewry są ograniczone. Gdy wyprzedzanie jest niemożliwe i ruch pojazdów odbywa się w zwartych kolumnach o podobnych prędkościach, to mówimy o stanie wymuszonym.

Rzeczywistą zależność intensywności ruchu od gęstości przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Rzeczywisty rozkład ruchu
Fig. 5. Real traffic diagram

5. REGUŁA „SLOW TO START"

Model Nagela-Schreckenberga nie do końca wiernie odtwarza mikroskopowy poziom ruchu. Makroskopowe zachowanie się rzeczywistego ruchu, np. spontaniczne tworzenie się zatorów (korków), może być zamodelowane poprzez użycie prostego stochastycznego parametru – prawdopodobieństwa zahamowania p. Należy jednak zauważyć, że w tym modelu ruch pojedynczego pojazdu może wykazywać nierealistyczne cechy, np. zatrzymanie się pojazdu od prędkości maksymalnej do zera w ciągu jednego kroku czasowego. Takie zachowania się automatu powodują, że nie możemy zaobserwować w tym modelu stanów metastabilnych.

Stany te możemy zamodelować poprzez zaimplementowanie reguł „slow-to-start", które polegają na przyspieszaniu stojących pojazdów z mniejszym prawdopodobieństwem niż pojazdy znajdujące się w ruchu.

Jednym z takich automatów jest model „Takayasu and Takayasu", w którym prawdopodobieństwo zahamowania (druga reguła) zależy od luki między pojazdami. Model

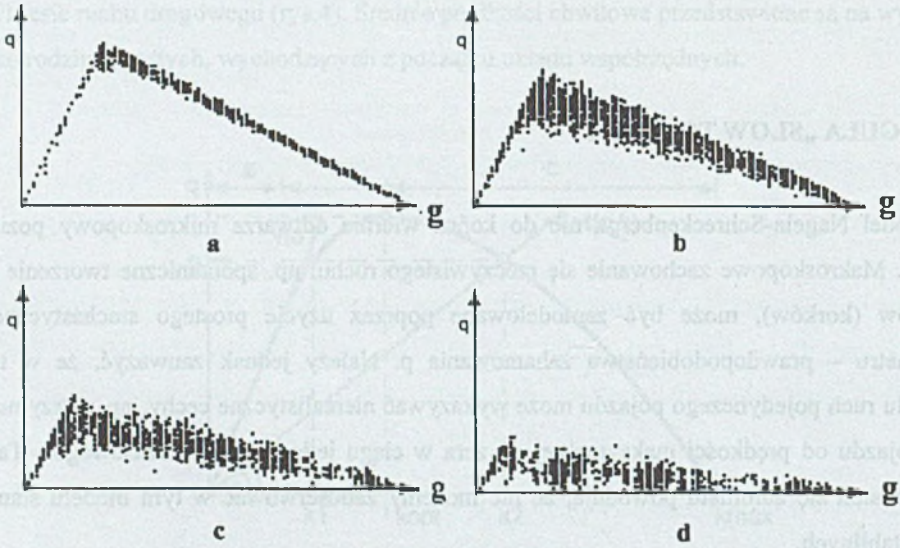
ten ma na celu naśladowanie strat czasu związanych z ruszaniem pojazdów w korkach. Oznacza to, że straty czasu są większe, gdy pojazd rusza, a mniejsze, gdy pojazd hamuje w trakcie jazdy [p(g<=1)=7/10 >> p(g>1)=2/10].

Stan metastabilny brany jest również pod uwagę w automacie VDR (velocity-dependent randomization), w losowym automacie zależnym od prędkości. W modelu tym wszelkie straty losowe zależne są od prędkości [p = p(v(t))].

W automacie Fukui – Ishibashi prawdopodobieństwo zatrzymania pojazdu zależy w głównej mierze od prędkości maksymalnej $p(v_{max})=2/10$.

6. ANALIZA MODELU STANDARDOWEGO W ZALEŻNOŚCI OD PARAMETRU P

W celu dostosowania modelu standardowego (Nagel-Schreckenberg) do rzeczywistej sytuacji na drogach porównano fundamentalne wykresy ruchu drogowego w zależności od parametru p.



Rys. 6. Przykładowe wyniki symulacji dla parametru p: a) 0, b) 0,2, c) 0,5, d) 0,8
Fig. 6. Simulation results for p parametr : a) 0, b) 0,2, c) 0,5, d) 0,8

Do badania wykorzystano symulator modeli automatów komórkowych opracowany przez C.Horstmanna i K.Bolaya, działający w środowisku Java.

Przeprowadzono symulację zmieniając gęstość ruchu k [P/komórka] w zakresie (0% – 100%) dla stałych wartości parametru losowości p w zakresie (0,0 – 1,0). Na wykresach fundamentalnych (rys. 6), jako wynikach symulacji, zaobserwowano zmiany intensywności ruchu q, od wielkości parametru p.

Analizując wyniki symulacji (rys.6), oraz rzeczywisty rozkład ruchu (rys.5) można zauważyć, że parametr p=0,2 najlepiej odzwierciedla charakterystyczne właściwości rzeczywistego ruchu drogowego.

7. PODSUMOWANIE

Model ruchu pojazdów bazujący na automacie komórkowym eliminuje wady jakie wynikają z charakteru techniki symulacji: upraszczanie rzeczywistości, konieczność weryfikacji modelu oraz czasochłonność programowania. Model ten oparty na prostych regułach zdolny jest do odtwarzania charakterystycznych właściwości rzeczywistego ruchu drogowego uwzględniając stochastyczny charakter niektórych elementów systemu transportowego. Dalsze badania prowadzone będą w obszarze oceny jakości komórkowego modelu systemu sterowania transportu miejskiego.

Literatura

1. Barlovic R., Esser J., Froese K., Knospe W., Neubert L., Schreckenberg M., Wahle J.: Online Traffic Simulation with Cellular Automata, 1997.
2. Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1997.
3. Howard K.R.: Usuwanie zatorów w ruchu drogowym, Świat nauki, 1997.
4. Kułakowski K.: Automaty komórkowe, Ośrodek Edukacji Niestacjonarnej, 2000.
5. Nagel K., Schreckenberg M.: A cellular automaton model for freeway traffic, 1992.
6. Barlovic R., Santen L., Schadschneider A., Schreckenberg M.: Metastable states in cellular automata for traffic flow, The European Physical Journal B, 1998.
7. Rickert M., Nagel K.: Experiences with a simplified microsimulation, International Journal of Modern Physics C, Vol. 8, No. 3, 1997.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Piecha

Abstract

The transportation systems need many additions that allow to analyse not only the statics of the traffic flow but also many transportation details concernig dynamic factors of the system. The paper shows the idea how to describe the transpotration system by cellular automata theory.

The fundamental advantage of this approach is a complexity reduction of the calculations that have to be done in simulation processes. They are not only reasonable reduced but the model of the system contains more optimisation componets; mainly for dynamic of the system analysis.

The paper shows the sample experiments that have been done in the Department of Informatics, Institute of Transport. These new simulation ideas are still under development in this group.