ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: TRANSPORT z. 57 Nr kol. 1675

Bartłomiej PŁACZEK, Jan PIECHA

MODEL KOMÓRKOWY STEROWANIA RUCHEM DROGOWYM

Streszczenie. W artykule przedstawiono elementy teorii automatów komórkowych oraz ich implementację dla opisu procedur sterowania ruchem drogowym [1, 2]. Dane wejściowe automatu komórkowego są rejestrowane za pomocą wideokamery cyfrowej zainstalowanej w obszarze skrzyżowania. Obraz rejestrowany przez kamerę zostaje poddany odpowiedniej obróbce filtrującej nadmiarowych elementów informacyjnych obrazu. Na odfiltrowanym obrazie przeprowadzona zostaje analiza kształtu pojazdów określających ich klasę. Wyodrębnionym klasom pojazdów zostały przyporządkowane odpowiednie parametry ruchu drogowego. Pierwsze zastosowania automatów komórkowych dotyczyły modeli symulacyjnych ruchu drogowego oraz pewnych aspektów prognozowanie parametrów ruchu [3, 4, 5]. W opracowanej metodzie przedstawiono zasady podejmowania decyzji sterujących opartych na zapisie komórkowym obiektu sterowania. Wykazano ponadto wyższość modelu komórkowego nad klasycznymi metodami wyliczania parametrów sterownia duchem drogowym.

THE CELLULAR MODEL FOR A ROAD TRAFFIC CONTROL

Summary. The paper presents a cellular automata (CA) theory fundamentals and their implementation for a traffic control procedures description [1, 2]. The input data of CA are recorded by digital video cameras installed on the traffic lanes intersection. The obtained data is in a special way filtered from a redundant image data factors. On the processed image the vehicles shapes analysis is carried out, for their class recognition. The extracted vehicles classes are provided with an adequate traffic parameters. The early applications of CA concerned the road traffic simulation models [3],[4],[5]. The simulation theories were used for decision making units development, able to choose an optimal road-traffic control strategy. In the elaborated method the control decision making principles were defined. A higher value of CA model, for the traffic control, than the classic approach was also discussed.

1. WPROWADZENIE

Teoria automatów komórkowych umożliwia dokonanie podziału modelu symulacyjnego na elementy analizowane iteracyjnie, komórka po komórce. W niniejszej pracy przedstawiono elementy algorytmu symulacji ruchu drogowego oraz zasady wykorzystania tego modelu do wyznaczania parametrów sterowania ruchem drogowym.

Zaproponowany model pozwala na znaczną redukcję błędów sterowania, które wnoszą klasyczne metody wyznaczania opisu parametrów ruchu [11]. Modelowanie ruchu drogowego

oparte na zasadach automatów komórkowych umożliwia bieżące (dynamiczne) wyliczanie parametrów ruchu między dwoma odcinkami sieci drogowej; modelowanie czasu przejazdu, oraz stanów wewnętrznych systemu sterownia. Reguły zapisu danych obiektu sterowania umożliwiają bieżące zmiany parametrów ruchu drogowego dla rozpoznanych klas pojazdów.

W komórkowej metodzie modelowania ruchu drogowego pasy ruchu podzielono na komórki o zadanej (stałej) długości. Natomiast pojazdom przyporządkowano zestawy możliwych prędkości jazdy. W każdym takcie próbkowania i obliczeń wyznaczane są czasy jazdy dla pojazdów obszaru modelu komórkowego; przemieszczających się zgodnie z regułami tych automatów [12].

Prosty oraz iteracyjny zapis systemu modelowania sprawił iż aparat automatów komórkowych stał się popularnym narzędziem mikroskopowego opisu wielu wolnozmiennych procesów, w tym ruchu drogowego. Model komórkowy charakteryzuje mała złożoność obliczeniowa oraz możliwość dostatecznie dokładnego odwzorowania i symulacji różnych stanów ruchu miejskiego [15]. Ponadto możliwy jest pomiar i prognozowanie wartości miar i stanów wyjściowych modelu, w procesach optymalizacji adaptacyjnego sterowania ruchem miejskim [16, 17].

2. KOMÓRKOWY MODEL RUCHU DROGOWEGO

Zasady modelowania ruchu drogowego, na podstawie automat komórkowego, przedstawili w 1992 roku Nagel i Schreckenberg (NaSch) [20]. W ich opracowaniu zaproponowano podział pasa ruchu na komórki o długości 7,5 metra. Przyjęto również, że każdy pojazd porusza się z prędkością nie mniejszą od zera i nie większą od ustalonej prędkości maksymalnej (rys. 1).

Rys. 1. Model ruchu drogowego NaSch
Fig. 1. The NaSch cellular road traffic model

Prędkość jest liczona jako liczba komórek przebyta przez pojazd w jednostce czasu. Natomiast ruch pojazdów opisany jest regułą składającą się z czterech kroków; wykonywanych równolegle dla wszystkich pojazdów modelu. Taki model zastosowano również w niniejszym opracowaniu.

Możliwość odwzorowania parametrów rzeczywistych potoków ruchu pozwala uwzględnić takie cechy ruchu, jak: zależność gęstości od natężenia ruchu, losowe występowanie zatorów oraz przestrzenno-czasowy charakter powstawania zatorów ulicznych.

W klasycznym modelu NaSch ruch pojedynczego pojazdu może wykazywać mało realne cechy, jak: zmniejszenie prędkości pojazdów od wartości maksymalnej do zera w ciągu jednego kroku czasowego. Taka właściwość prowadzi do braku możliwości zaobserwowania stanów metastabilnych w modelu [2]. Natomiast w rzeczywistości, dla pewnych gęstości ruchu, strumień pojazdów może pozostawać w jednym z dwóch stanów.: W pierwszym przypadku występuje separacja faz – gdzie strumień pojazdów jest podzielony na dwie części: na zator i na fazę ruchu swobodnego. W drugim przypadku występują bardzo słabe oddziaływania między pojazdami, a prędkości pojazdów pozostają prawie niezmienne

(jednakowe). Wówczas system pozostaje w „homogenicznym" stanie swobodnym nazwanym metastabilnym, nie obserwowanym w modelu symulacyjnym klasycznej metody NaSch.

Literatura zawiera szereg opracowań wykorzystujących model komórkowy NaSch, uwzględniających stany metastabilne ruchu drogowego [2, 5, 8, 14]. Są to modele realizujące reguły „slow-to-start" (s2s), w których następuje losowe przyspieszanie pojazdów zatrzymanych z mniejszym poziomem prawdopodobieństwa, niż pojazdów znajdujących się w ruchu. Pierwszy model realizujący regułę s2s opracowali M. Takayasu i H. Takayasu. Model zakłada, że pojazd zatrzymany oraz mający dokładnie jedną pustą komórką przed sobą, przyspiesza z prawdopodobieństwem $q_l < 1$, podczas gdy wszystkie pozostałe pojazdy przyspieszają deterministycznie [3].

Na podstawie modelu automatu NaSch powstały również modele ruchu wielopasowego, dla których wprowadzane zostały dodatkowe elementy uwzględniające dokonywanie przez pojazdy zmian pasa ruchu. Podstawowe reguły opisujące ruch pojazdów są rozszerzane o losowe reguły zmiany pasa ruchu, a procedura aktualizacji jest dzielona zazwyczaj na dwie fazy. W pierwszej fazie następuje zmiana pasa ruchu, w drugiej fazie następuje modelowanie ruchu pojazdów w przód.

Rickert i współautorzy [18] zaproponowali modyfikację modelu NaSch, dla dróg dwupasowych. Podobnie Knospe i współautorzy [10] przystosowali reguły NaSch do modelu dwupasowego. Modyfikację dla modelu wielopasowego zaproponowali Wagner, Nagel i Wolf [22]. W tym modelu dodatkowe reguły zmiany pasa ruchu uwzględniają elementy bezpieczeństwa oraz przepisów ruchu drogowego.

Automaty komórkowe stosowano również do modelowania ruchu drogowego na skrzyżowaniach. W opracowaniu [19] symulacja skrzyżowania traktowała je bezwymiarowo. Pojazdy zapisywano na wlocie lub wylocie skrzyżowania, nigdy wewnątrz skrzyżowania. Uwzględnienie w modelach symulacyjnych przepustowości samych skrzyżowań oznaczało konieczność wprowadzenia szczegółowych reguł pierwszeństwa oraz modelowania sygnalizacji świetlnej (rys. 2a) [9].

Inne podejście polega na definiowaniu modelu, w którym skrzyżowania są reprezentowane przez pierścienie komórek (kształt ronda) łączące wloty i wyloty skrzyżowania (rys. 2b) [7].

W źródłach literaturowych można znaleźć propozycje zastosowań komórkowych modeli miejskich sieci drogowych w metodach określania optymalnej trasy przejazdu [21] oraz doboru podstawowych parametrów synchronizacji dla sieci skrzyżowań ze skoordynowaną sygnalizacją świetlną [4]. Badane modele były znacznie uproszczone i dalekie od praktycznych rozwiązań.

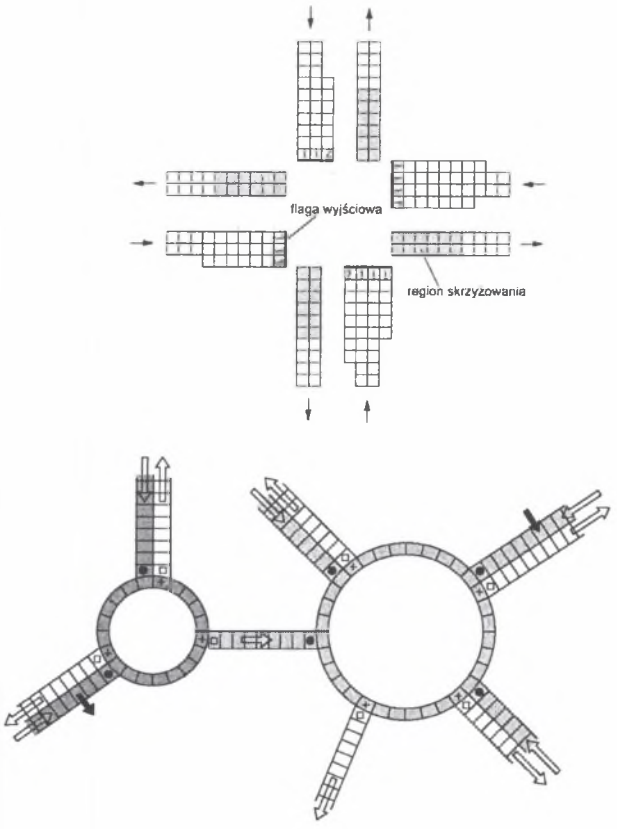
Można także napotkać opracowania dotyczące komórkowych modeli ruchu drogowego o charakterze makroskopowym – pojedyncza komórka takiego modelu obejmuje odcinek drogi, na którym może się znaleźć wiele pojazdów, natomiast stan komórki opisują parametry strumienia pojazdów, jak gęstość czy intensywność ruchu. Tego rodzaju model został zaproponowany przez Carlosa Daganzo [6], jest to model dedykowany dla ruchu autostradowego. Podobny model komórkowy wykorzystywany jest do wyznaczania wskaźników jakości sterowania ruchem w sieci w metodzie UTOPIA [13], która została wdrożona w kilkunastu miejscach w Europie.

W publikowanych w literaturze opracowaniach automat komórkowy, uwzględniający parametry pojedynczych pojazdów, służy jako narzędzie symulacji ruchu drogowego. Nie rozpatrywano możliwości wykorzystania wyników symulacji do optymalizacji sterowania w skali pojedynczego skrzyżowania. Prowadzone badania w tym zakresie dotyczyły głównie modelowania sieci drogowych o dużych rozmiarach, na różnych poziomach szczegółowości odwzorowania [9, 7]. Ponadto próby wprowadzenia komórkowych systemów symulacji „on-

line" opierały się wyłącznie na źródłach danych dotyczących makroskopowych parametrów strumieni pojazdów [1].

a)

b)



Rys. 2. Komórkowe modele skrzyżowań
Fig. 2. Cellular models of crossroads

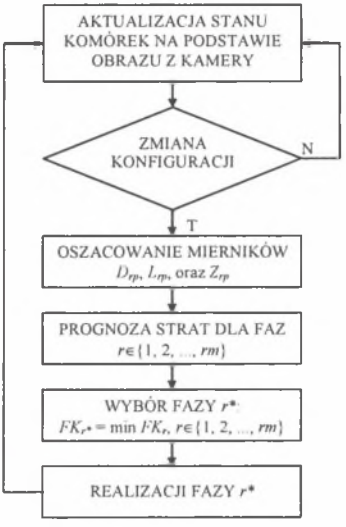
3. KOMÓRKOWY ALGORYTM STEROWANIA

W niniejszym punkcie przedstawiona została koncepcja sterowania ruchem drogowym, w której reguła automatu komórkowego posłużyła do oszacowania strat powstających w wyniku zatrzymywania pojazdów na wlotach skrzyżowania. Zajętość komórki traktowana jest jak zajętość odcinka drogi i nie jest jednoznacznie identyfikowana z obecnością wybranego pojazdu na pasie ruchu. Pojedynczy pojazd może zajmować kilka komórek na pasie ruchu.

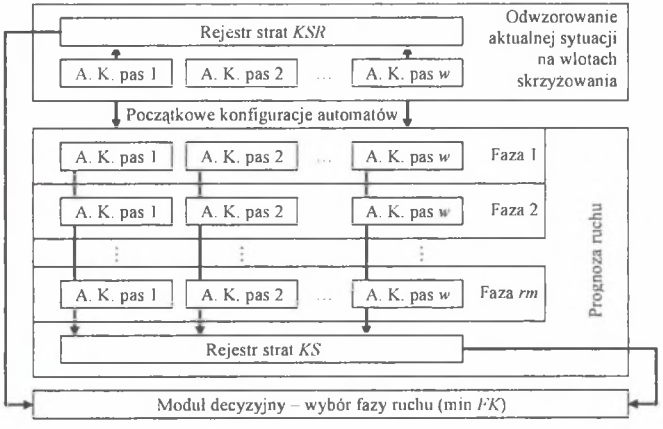
Na rys. 3 przedstawiono schemat blokowy algorytmu sterowania ruchem drogowym, który wykorzystuje model komórkowy. Wartości strat FK_r są prognozowane na drodze symulacji ruchu na skrzyżowaniu za pomocą automatów komórkowych, dla czasu T. Warunki początkowe modelu symulacji określają elementy konfiguracyjne automatów dla t_0.

Kolejne stany konfiguracji, dla: $t_0 + 1$, $t_0 + 2$, ..., $t_0 + T$ wyznaczane są iteracyjnie za pomocą reguły automatu komórkowego. Okres T obejmuje czas potrzebny na opuszczenie skrzyżowania przez pojazdy, dla których w zadanej fazie ruchu r przydzielono sygnał zielony.

Miary D_{rp}, L_{rp}, Z_{rp} zawierają skumulowane składowe strat (czasu, długości kolejek, liczby zatrzymań) dla pojazdów na wlotach skrzyżowania, od chwili ich zarejestrowania w modelu komórkowym do chwili t_0.



Rys. 3. Algorytm sterowania ruchem drogowym wykorzystujący model komórkowy
Fig. 3. The algorithm for road traffic control using cellular model



Rys.4. Schemat modułowy komórkowego systemu sterowania ruchem drogowym (A. K. - automat komórkowy symulujący pojedynczy pas ruchu)
Fig. 4. Module schema of the cellular system for road traffic control (A. K. - cellular automaton for single traffic lane simulation)

Zadania poszczególnych modułów algorytmu sterowania zilustrowano na rys. 4. W pierwszej fazie działania oprogramowania odbywa się rejestracja (rozpoznanie) bieżącego stanu ruchu drogowego na wlotach skrzyżowania i jego odwzorowanie w mapie danych automatów komórkowych. Następuje aktualizacja modelu komórkowego, na podstawie danych otrzymywanych z modułu przetwarzania obrazu.

Zmiana konfiguracji w którymkolwiek z automatów reprezentujących aktualne rozmieszczenie pojazdów, oznacza uruchomienie procedur prognozowania ruchu drogowego. Aktualna konfiguracja automatów komórkowych jest kopiowana do modułu prognozy.

W module prognozy realizowany jest algorytm predykcji ruchu drogowego dla wszystkich faz sygnalizacji, które w danej chwili mogłyby zostać wybrane do realizacji. Rezultatem prognozy ruchu jest oszacowanie strat FK_r, $r \in \{1, 2, ..., rm\}$ ruchu drogowego dla poszczególnych faz. Moduł decyzyjny dokonuje wyboru fazy r^*, dla której straty FK_{r^*} są minimalne. Z kolei następuje przejście systemu sterowania ruchem do realizacji wybranej fazy r^*.

4. OCENA METODY – BADANIA SYMULACYJNE

Ocenę metody zaproponowanej powyżej przeprowadzono na podstawie modelu symulacyjnego przykładowego skrzyżowania o dwóch wlotach jednopasowych, sterowanych odrębnymi fazami ruchu. Tak zwany czas międzyzielony, warunkujący bezpieczeństwo przy przełączaniu faz wynosi 4 sekundy. W chwili t_0 realizowana jest faza pierwsza – sygnał zielony dla wlotu nr 1 oraz sygnał czerwony dla wlotu nr 2.

Przeprowadzono symulacyjne badania ruchu dla rozpatrywanego przykładu skrzyżowania w celu porównania następujących metod:

- model komórkowy sterowania ruchem drogowym,
- sterowanie stałoczasowe,
- sterowanie akomodacyjne, w układzie z jedną pętlą indukcyjną (#1),
- sterowanie akomodacyjne, w układzie z parą pętli indukcyjnych (#2).

Symulacja wszystkich opcji sterowania uwzględniała identyczną sekwencję zgłoszeń pojazdów w okresie obejmującym 2000 iteracji. Jedna iteracja odpowiada sekundzie czasu rzeczywistego. Pojazdy były generowane ze średnią intensywnością równą 0,19 poj/s.

Tabela 1

Zestawienie wyników symulacji

Algorytm sterowania	Średnia liczba pojazdów na wlotach [poj]	Straty czasu [s]	Liczba zatrzymań
Stałoczasowy	10,98	15290	843
Akomodacyjny #1	10,08	13672	700
Akomodacyjny #2	8,92	11635	651
Komórkowy	7,66	9246	599

Podstawę porównania efektywności badanych algorytmów sterowania ruchem drogowym stanowią zarejestrowane podczas symulacji parametry opisujące warunki ruchu, tj. liczba pojazdów na wlotach skrzyżowania (długość kolejek), straty czasu powstałe w wyniku zatrzymywania pojazdów na skrzyżowaniu oraz liczba zatrzymań.

Wartości tych miar, wyznaczone symulacyjnie dla badanych algorytmów, zestawiono w tab. 1.

5. PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki badań symulacyjnych wskazują na wyraźną przewagę algorytmu komórkowego sterowania ruchem drogowym; w każdej kategorii oceny, w porównaniu do pozostałych, powszechnie stosowanych metod.

Przewaga automatów komórkowych wynika z faktu, że uwzględniają one nie tylko dane o liczbie pojazdów na wlotach skrzyżowania, ale również o ich rozmieszczeniu i prędkościach przemieszczania się. Prędkości pojazdów nie są mierzone bezpośrednio, lecz szacowane i uśredniane na podstawie wielu danych zgromadzonych w modelu komórkowym.

Zastosowanie wideokamery do aktualizacji stanu automatu komórkowego pozwala dokładnie odwzorować strumień pojazdów i prognozować obciążenie pasów ruchu na skrzyżowaniu dla różnych wariantów sterowania. Jednym słowem, dysponujemy pełniejszym obrazem do podejmowania korzystniejszych decyzji sterujących.

Należy również zauważyć, że w algorytmie komórkowym nie ma potrzeby określenia stałych parametrów programu sygnalizacji, jak dolne czy górne ograniczenie czasu trwania sygnału zielonego.

Literatura

1. Barlovic R., Esser J., Froese K., Knospe W., Neubert L., Schreckenberg M., Wahle J.: Online Traffic Simulation with Cellular Automata, 1997.
2. Barlovic R., Santen L., SchadschneiderA., Schreckenberg M.: Metastable states in cellular automata for traffic flow, The European Physical Journal B, 1998.
3. Berlovic R., Schadschneider A., Schreckenberg M.: Random walk theory of jamming in a cellular automation model for traffic flow, Physica A, vol.294, Elsevier Science Ltd, 2001.
4. Brockfeld E., Barlovic R., Schadschneider A., Schreckenberg M.: Optimizing traffic lights in a cellular automaton model for city traffic, Phys. Rev. E, Vol 64, 056132, 2001.
5. Chowdhury D., Santen L., Schadschneider A.: Statistical physics of vehicular traffic and some related systems, Physic Reports, vol.329, Elsevier Science Ltd, 2000.
6. Daganzo C.: The cell transmission model. Part II: Network traffic, Transportation Research B. 29 (2), 1995
7. Dupuis A., Chopard B., Parallel simulation of traffic in Geneva using cellular automata.
8. [ER97] Emmerich H., Rank E.: An improved cellular automation model for traffic flow simulation, Physica A, vol.234, Elsevier Science Ltd, 1997.
9. Esser J., Schreckenberg M.: Microscopic simulation of urban traffic based on cellular automata, International Journal of Modern Physics C, Vol. 8, No. 5, 1997.
10. Knopse W., Santen L., Schadschneider A., Schreckenberg M.: Disorder in cellular automata for two-lane traffic, Physica A, vol.265, Elsevier Science Ltd, 1999.
11. Kułakowski K.: Automaty komórkowe, Ośrodek Edukacji Niestacjonarnej, 2000.
12. Howard K. R.: Usuwanie zatorów w ruchu drogowym, Świat Nauki, 1997.
13. Mauro V., Taranto C.: UTOPIA, Proceedings of the 6th IFAC/IFORS Conference on Control, Computers and Communications in Transport, Paris, 1989.
14. Pottmeier A., Berlovic R., Knopse W., Schadschneider A., Schreckenberg M.: Localized defects in a cellular automation model for traffic flow with phase separation, Physica A, vol.308, Elsevier Science Ltd, 2002.

15. Płaczek B.: Model węzła drogowego z zastosowaniem automatów komórkowych, Praca dyplomowa, Instytut Transportu Pol. Śl., Katowice 2002.
16. Płaczek B., Metoda automatów komórkowych w dynamicznym modelu sterowania ruchem drogowym, Rejestracja i przetwarzanie danych w telematycznych systemach transportu, praca zbiorowa pod red. Jana Piechy, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
17. Piecha J., Płaczek B., Gołosz J., Elementy sterowania i zarządzania ruchem drogowym z wykorzystaniem automatów komórkowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, ser. Transport z. 48, nr kol. 1604, Gliwice 2003
18. Rickert M., Nagel K., Schreckenberg M., Latour A.: Two Lane Traffic Simulations using Cellular Automata, Physica A, submitted, 1995.
19. Rickert M., Nagel K.: Experiences with a simplified microsimulation for the Dallas/Fort Worth area, International Journal of Modern Physics C, Vol. 8, No. 3, 1997.
20. Nagel K., Schreckenberg M.: A cellular automaton model for freeway traffic, J. Phys. I France 2, 1992.
21. Wahle J., Annen O., Schuster Ch., Neubert L., Schreckenberg M.: A dynamic route guidance system based on real traffic data, Euro. J. Op. Res.,74-80, 2001.
22. Wagner P., Nagel K., Wolf D. E.: Realistic Multi-Lane Traffic Rules for Cellular Automata, Physica A, submitted, 1996.

Recenzent: Dr hab. inż. Romuald Szopa, prof. Pol. Częstochowskiej