



# PORTFOLIO:

## System modelowania i analizy ruchu miejskiego z wykorzystaniem do inteligentnego sterowania ruchem

*Autorzy: Andrzej Bielecki, Marzena Bielecka, Jarosław Wąs, Zbigniew Markiewcz*

Centrum Inteligentnych Systemów Informatycznych Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
budynek C-2 pokój 426 tel: 12 617 44 53 www.isi.agh.edu.pl isi@agh.edu.pl



# 1. Wprowadzenie

W ostatnich latach technologie informatyczne coraz szerzej wykorzystuje się w inżynierii ruchu drogowego. Jedną z najpopularniejszych koncepcji skryształizowanych w ostatnich latach są Inteligentne Systemy Transportowe (ITS), które są obecnie szeroko rozwijane w postaci praktycznych aplikacji [1-5]. ITS jako koncepcja pojawiły się w latach dziewięćdziesiątych dwudziestego wieku. Inteligentne systemy transportowe obejmują szereg technologii informatycznych, telekomunikacyjnych, metrologicznych (pomiarowych) czy też obejmujących rozwiązania z dziedziny automatyki. Celami towarzyszącymi zastosowaniu ITS są przede wszystkim:

- Zmniejszenie czasów podróży i zużycia energii związanej z przemieszczaniem się.
- Poprawa komfortu podróżowania dla użytkowników transportu indywidualnego oraz zbiorowego.
- Poprawa bezpieczeństwa ruchu drogowego.
- Ochrona środowiska naturalnego.

Powyższym celom ogólnym towarzyszy szereg celów szczegółowych obejmujących między innymi: zwiększenie przepustowości sieci komunikacyjnej, redukcja kosztów obsługi taboru drogowego, kolejowego itd., redukcja kosztów związanych z utrzymaniem i renowacją szlaków komunikacyjnych (infrastrukturą drogową oraz kolejową itp.).

W niniejszym projekcie skupiamy się na opracowaniu teoretycznych podstaw związanych z modelowaniem ruchu miejskiego w oparciu o koncepcję **Data-Driven Modeling**. Należy podkreślić, że rozwiązania w zakresie symulacji drogowych wykorzystujące dane rzeczywiste są obecnie przedmiotem wielu badań [3-12].

Na bazie opracowanych modeli teoretycznych zostaną stworzone rozwiązania, które można bezpośrednio wykorzystać przy tworzeniu Inteligentnych Systemów Transportowych. Do celów predykcji wykorzystane będą algorytmy predykcji wykorzystujące dane uzyskiwane z urządzeń pomiarowych (takich jak pętle indukcyjne, kamery itp), a następnie dane te będą wykorzystywane do predykcji w sieci drogowej i tworzenia złożonych analiz natężenia ruchu. W predykcji będą wykorzystywane modele sztucznej inteligencji bazujące na wnioskowaniu statystycznym i rozmytym, modelowaniu układów dynamicznych na grafach oraz zastosowaniu automatów komórkowych. Podstawą algorytmów będą sztuczne sieci neuronowe, systemy wieloagentowe oraz systemy ekspertowe wykorzystujące opracowane modele formalne.

## 2. Podstawowe aspekty modelowania ruchu samochodowego z wykorzystaniem automatów komórkowych

Automaty komórkowe CA można przedstawić w postaci czwórki  $(L, S, N, f)$ , gdzie poszczególne elementy oznaczają:

L – **przestrzeń** podzieloną na siatkę komórek,

S – zbiór skończonych **stanów**,

N – zbiór **sąsiadów** danej komórki siatki,

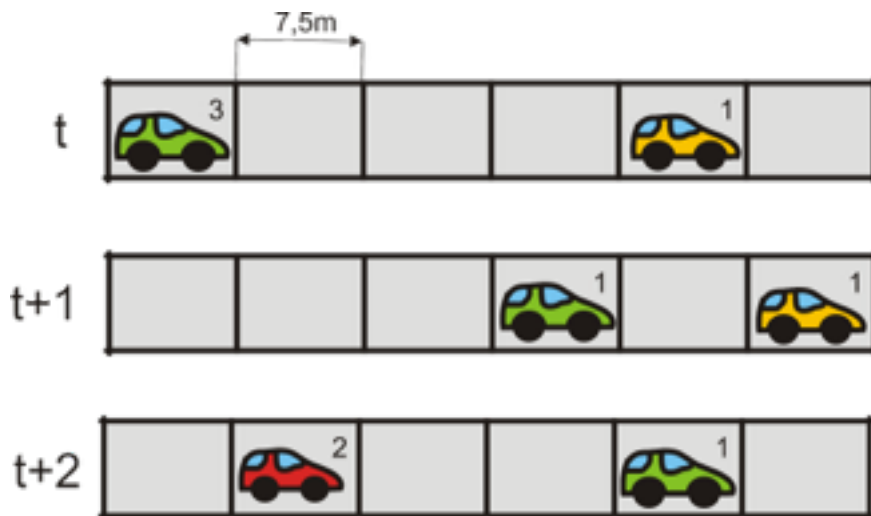
f – **funkcja zmiany konfiguracji** w poszczególnych komórkach.

Konfiguracja  $C_t$  jest funkcją, którą łączy stan z każdą komórką siatki. Funkcja f zmienia konfigurację  $C_t$  w nową konfigurację  $C_{t+1}$ . Z symulacyjnego punktu widzenia jest to niezwykle wydajna metoda tworzenia symulacji komputerowych.

Klasycznym modelem opartym na automatach komórkowych [7], opisującym ruch samochodowy, jest model Nagela-Schreckenberga (nazywany również krótko

NaSch). Model ten dotyczy ruchu samochodów na autostradzie, lecz jest punktem odniesienia również dla symulacji ruchu miejskiego. W modelu *NaSch* przyjęto rozmiar komórki równy  $d = 7,5 m$ . Prędkość pojazdu opisywana jest liczbą komórek pokonywanych przez pojazd w chwili czasowej (Rys.1). Model ten w klasycznej postaci opisują następujące reguły ruchu:

- **Przyspieszenie:**  $v(t+1) \rightarrow \min(v(t)+1, v_{\max})$ , gdzie  $v(t)$  to prędkość aktualna
- **Hamowanie:**  $v(t+1) \rightarrow \min(v(t), g(t)-1)$ , gdzie  $g(t)$  jest liczbą pustych komórek pomiędzy pojazdami
- **Element losowy** - losowe hamowanie: prawdopodobieństwo  $p$ , że znajdzie  $v(t+1) \rightarrow \max(v(t)-1)$ , jeżeli  $v(t) \geq 1$
- **Ruch** (zmiana położenia w czasie):  $x(t+1) = x(t)+v(t)$



**Rys. 1.** Ruch w modelu Nagela-Schreckenberga na pasie ruchu w kolejnych chwilach czasowych. W lewym górnym rogu każdej komórki możemy zaobserwować aktualną prędkość pojazdu wyrażoną w liczbie komórek pokonywanych w jednej chwili czasowej.

Jedną z głównych wad modelu NaSch jest fakt, iż dynamika pojedynczego samochodu nie jest dobrze odwzorowywana. Przyspieszenie pojazdu może przyjmować

zbyt duże wartości, które odbiegają znacznie od rzeczywistości, a drugi krok modelu opisujący hamowanie służy tylko zapobieganiu kolizjom i zapewnieniu odpowiedniego odstępu między samochodami, nie odwzorowując przy tym rzeczywistego zachowania pojazdu podczas zwalniania. W konsekwencji wartości związane z ruchem samochodu (jak zużycie paliwa, emisja spalin) nie są dobrze opisywane. Należy również zauważyć, że model NaSch powstał w celu symulacji przepływu pojazdów na autostradzie. Ruch miejski ma trochę inny charakter – polega na ciągłym hamowaniu i przyśpieszaniu, podczas gdy pojazdy na autostradzie utrzymują przez większą część czasu stałą prędkość.

Zaproponowany w [7, 8] model kładzie większy nacisk na kwestię dokładniejszego opisu ruchu pojedynczego samochodu. Wprowadzono w nim zmienne przyśpieszenie pojazdu, które w szczególności może przyjmować wartości mniejsze niż w modelu NaSch oraz stopniowe zwalnianie przed przeszkodą i poprzedzającym samochodem.

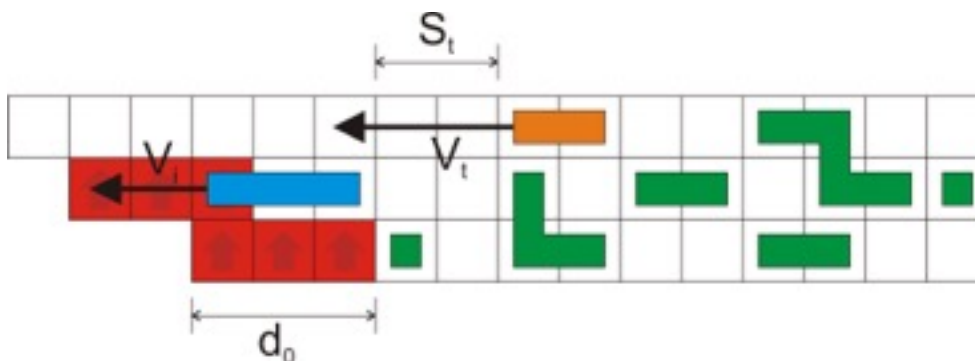
W stosunku do modelu NaSch proponujemy inny sposób reprezentacji pojazdu na siatce automatu. W oryginalnym modelu samochód zajmuje zawsze pojedynczą komórkę. Rozwiązanie autorów zakłada natomiast, że pojedynczy pojazd może zająć większą ich liczbę. Dzięki temu pojedyncza komórka nie musi już odpowiadać odcinkowi rzeczywistej drogi o długości 7,5 m. Większa elastyczność w doborze skali modelu pozwala między innymi na osiągnięcie lepszego odwzorowania rzeczywistej prędkości samochodu niż w modelu NaSch. Proponowany model uwzględnia również wielopasmowe drogi oraz skrzyżowania ze światłami.

Obliczenie nowej konfiguracji automatu przebiega w sześciu kolejnych krokach, z których każdy jest wykonywany dla wszystkich samochodów. Następną fazę może być rozpoczęta tylko w momencie, gdy poprzedni krok zostanie wykonany dla wszystkich pojazdów. Fazy te są następujące:

- Podejmowanie decyzji o zmianie pasa
- Zmiana pasa z prawego na prawy
- Zmiana pasa z lewego na prawy
- Obliczenie prędkości

- Uwzględnienie losowości
- Ruch

Pierwsze trzy kroki związane są ze zmianą pasa ruchu. W pierwszym następuje faza podejmowania decyzji. W dwóch następnych krokach pojazdy, które wcześniej podjęły decyzję, zmieniają pasy w takiej kolejności, aby zapewnić pierwszeństwo pojazdom z prawej strony.



**Rys. 2.** Przykładowa konfiguracja wycinka siatki automatu – środowisko symulacyjne.

Decyzja o zmianie pasa jest podejmowana w przypadku, gdy pojazd znajduje się w odległości  $d_0$  lub mniejszej od jego końca. Samochód wybiera wtedy najdłuższy pas. Parametr  $d_0$  pozwala kontrolować zachowanie samochodów np. przy zwężeniu drogi i dostosować je tak, aby żaden pas nie był faworyzowany. Jeżeli samochód nie musi zmienić pasa z uwagi na jego koniec, decyduje się na jego zmianę w przypadku, gdy po wykonaniu manewru będzie mógł osiągnąć większą prędkość. Pojazd nie może się jednak znaleźć wtedy w odległości mniejszej niż  $d_0$  od końca pasa – wybranie kończącej się nitki jest zabronione. Jeżeli istnieją dwie alternatywne nitki, preferowana jest lewa.

Sama akcja zmiany pasa ruchu polega na zajęciu przez pierwszy segment pojazdu komórki leżącej w kierunku prostopadłym do kierunku jazdy. Jeżeli pojazd podjął wcześniej decyzję, ruch jest wykonywany z prawdopodobieństwem opisywanym przez funkcję  $p_c$ . Poprzez odpowiednie jej dobranie, można kontrolować, z jakim zapasem bezpieczeństwa samochody wykonują manewr. Wartość funkcji jest uzależniona od warunków na drodze opisywanych przez następujące wartości:

- prędkość samochodu zmieniającego pas  $V_i$ ,
- prędkość najbliższego pojazdu z tyłu na pasie docelowym  $V_t$
- odległość między samochodami  $S_t$ .

Wartości te pokazane są na rysunku 2 (rozpatrywany jest niebieski pojazd). Przykładowa funkcja  $p_c$  znajduje się poniżej:

$$p_c(V_i, S_t) = \begin{cases} 0,2 & , \text{gdy } V_t < S_t \\ 0,9 & , \text{gdy } V_t \geq S_t \end{cases}$$

W przypadku, kiedy prędkość pojazdu znajdującego się z tyłu na pasie, na który zamierza wjechać rozpatrywany samochód jest większa niż liczba wolnych komórek ( $V_t < S_t$ ), pojazd z tyłu będzie zmuszony do hamowania w aktualnej turze. Definiując funkcję uznano taką sytuację za niepożądaną, dlatego zmiana pasa w takich warunkach wykonywana jest z niskim prawdopodobieństwem wynoszącym 0,2. Jeżeli takie okoliczności nie mają miejsca, pojazd zmienia pas z prawdopodobieństwem 0,9. Prędkość samochodu zmieniającego pas nie jest w brana pod uwagę, jednak można sobie wyobrazić funkcję, która uwzględni to, jak szybko samochody zbliżają się do siebie, a więc również wielkość  $V_i$ .

Podobnie jak w modelu *NaSch*, pojazd w każdej iteracji porusza się zgodnie z kierunkiem jazdy o całkowitą liczbę komórek, jednak aby dokładniej opisać jego dynamikę, prędkość i przyspieszenie wyrażone są przez liczby zmiennoprzecinkowe, a nie całkowite, jak ma to miejsce w oryginalnym modelu. W każdym kolejnym kroku, prędkość jest zwiększana o wartość przyspieszenia, a całkowitą liczbę komórek, o jaką przesunie się pojazd w danej iteracji, określa wartość prędkości po odrzuceniu jej części ułamkowej.



W rzeczywistości przyrost prędkości samochodu następuje bardziej gwałtownie przy mniejszych prędkościach i spada w miarę jak pojazd się rozpędza. Jako, że jednym z celów modelu było umożliwienie jak najlepsze odwzorowanie zachowania się pojedynczego samochodu, postanowiono wprowadzić funkcję  $a(v)$  opisującą przyśpieszenie w funkcji prędkości, którą można dobrać tak, aby opisywała ona sposób przyśpieszania rzeczywistych pojazdów?

Uwzględniając maksymalną prędkość  $i$ -tego samochodu w chwili czasowej  $t$ , jego prędkość w chwili  $t+1$ , obliczaną w czwartym kroku modelu, można przedstawić w następujący sposób:

$$V(i, t+1) = \min(\{V_{\max}(i, t), V(i, t) + a(v(i, t))\})$$

Prędkość maksymalna  $V_{\max}(i, t)$  uwzględnia ograniczenia prędkości na danym odcinku (znaki oraz ograniczenia wynikające z rodzaju drogi), pozycję samochodu poprzedzającego (kolizje są niedozwolone) oraz sposób, w jaki samochód zwalnia w następujących sytuacjach:

- przed nieruchomą przeszkodą (końcem pasa, czerwonym światłem, nieruchomym pojazdem),
- przed wolniej poruszającym się samochodem, ograniczeniem prędkości.

Charakterystykę zwalniania samochodu najprościej można opisać przedstawiając jego maksymalną prędkość  $f_z(s)$  w funkcji odległości od nieruchomej przeszkody. Odpowiednio dobierając tą funkcję, możemy kontrolować zachowanie się pojazdów podczas zwalniania. Resztę podanych wyżej przypadków można w prosty sposób sprowadzić do sytuacji opisywanej przez funkcję  $f_z$ .

Dla zwalniania jednostajnego przed przeszkodą z opóźnieniem  $a_b$  funkcje  $f_z$  można przedstawić następująco:

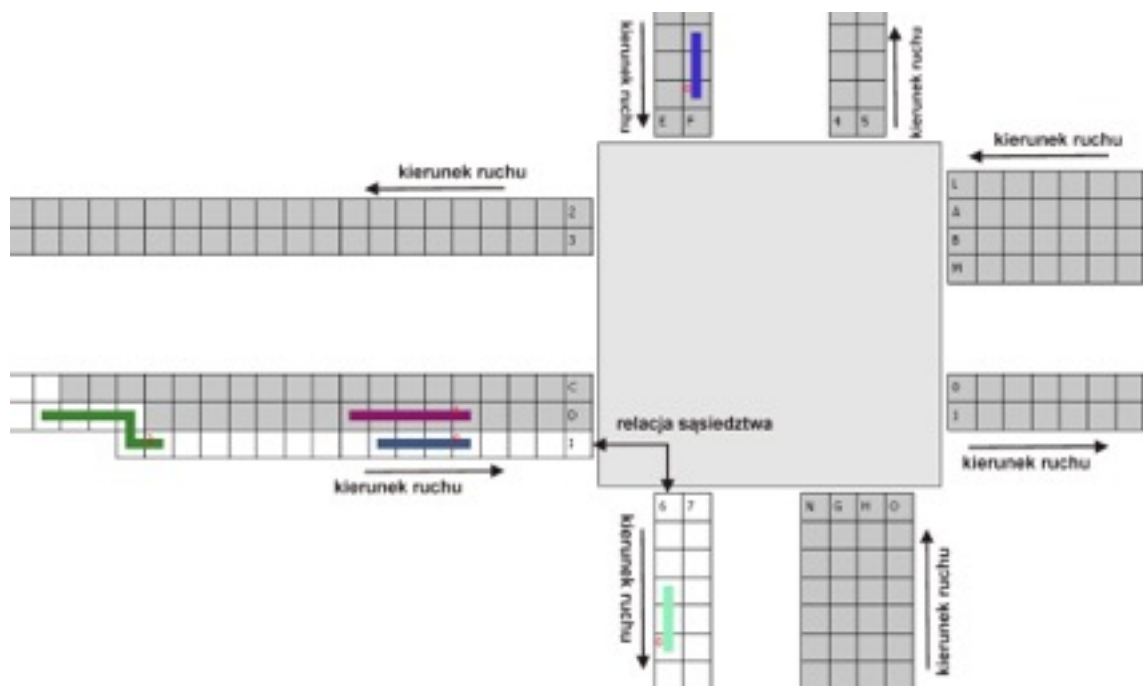
$$f_z(s) = \begin{cases} 0, & \text{dla } s = 0 \\ \max\left(1, \min\left\{s, \sqrt{2sa_b}\right\}\right) & \text{dla } s > 0 \end{cases}$$



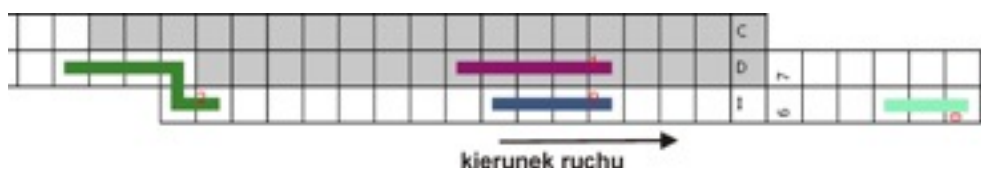
Wartość  $\sqrt{2sa_b}$  określa prędkość w ruchu jednostajnie opóźnionym w zależności od odległości. Powyższa funkcja uwzględnia dodatkowo następujące ograniczenia: pojazd nie może przejechać przez przeszkodę  $f_z(s) \leq s$  oraz mając przed nią przynajmniej jedną komórkę wolnego miejsca musi wykonać ruch  $f_z(s) \geq 1$  gdy  $s \geq 1$ .

### 3. Podstawowe aspekty modelowania sieci drogowej i skrzyżowań ze światłami

Sieć dróg może zostać przedstawiona w formie grafu skierowanego, w którym węzły reprezentują skrzyżowania, a krawędzie jednokierunkowe odcinki drogi pomiędzy nimi. Specjalnym rodzajem wierzchołków są generatory tworzące samochody na granicy modelowanej sieci drogowej i terminatory usuwające pojazdy wyjeżdżające poza modelowaną przestrzeń. Graf może być stworzony na podstawie mapy cyfrowej GPS i na tej podstawie zbudowana jest siatka automatu komórkowego. Zgodnie z rozwiązaniem opisanym w pracy Essera i Schreckenberga [10] ruch pojazdów na samym skrzyżowaniu nie jest modelowany, a jedynie definiowane są wejścia i wyjścia. Pojazdy przejeżdżają bezpośrednio z jednego odcinka drogi na drugi. Ruch ten można kontrolować poprzez zmianę sąsiedztwa skrajnych komórek należących do danych odcinków dróg. Sytuacja, w której komórki sąsiadują ze sobą jest równoznaczna z wystąpieniem zielonego światła. W momencie, kiedy dana komórka nie ma zdefiniowanego sąsiedztwa w kierunku ruchu, stanowi koniec pasa (czerwone światło) – pojazd zatrzyma się na niej zgodnie z regułami kontrolującymi prędkość. Zatem skrzyżowanie jest reprezentowane w tym przypadku w postaci zbioru reguł, które określają, jak zmieniać w czasie sąsiedztwo odpowiednich komórek. Ustąpienie pierwszeństwa przejazdu może zostać zrealizowane poprzez dodatkową zmianę światła (sąsiedztwa) w zależności od warunków na drodze.



**Rys. 3.** Przykładowe skrzyżowanie



**Rys. 4.** Skrzyżowanie z rysunku 3 z punktu widzenia zielonego pojazdu. Szare komórki nie są dla niego dostępne.

## 4. Kierunki potencjalnego zastosowania projektu

Projekt polega na opracowaniu teoretycznych podstaw modelowania i predykcji ruchu drogowego dla danego fragmentu miasta o ustalonej topografii, kierowaniu tym ruchem w różnych warunkach oraz zaimplementowaniu systemu opartego na opracowanym modelu. Przykładowe zadania realizowane z wykorzystaniem opracowanego systemu:

- a) Opracowanie algorytmu inteligentnego automatycznego sterowania ruchem w układzie kilku sąsiadujących skrzyżowań.
- b) Opracowanie algorytmu sterowania ruchem w obszarach, w których czasowo panują warunki nadzwyczajne, np. sterowanie ruchem w okolicach dużego stadionu lub dużej hali sportowej bezpośrednio po zakończeniu zawodów.
- c) Opracowanie algorytmu predykcji natężenia ruchu ze szczególnym uwzględnieniem alarmowania o możliwości wystąpienia sytuacji krytycznych w ruchu miejskim.
- d) Opracowanie całościowego algorytmu sterowania ruchem miejskim.
- e) Symulacje ruchu miejskiego w kontekście opracowania algorytmu jego optymalizacji.

## 5. Literatura

[1] <http://www.itspolska.pl>

[2] Bartczak K. Scenariusze rozwoju ITS w polskim transporcie drogowym w latach 2008-2013 cz.1, Przegląd ITS, nr 1

[3] Ye Tian & Yi-Chang Chiu A Variable Time-Discretization Strategies-Based, Time-Dependent Shortest Path Algorithm for Dynamic Traffic Assignment, Journal of Intelligent Transportation Systems, Technology, Planning, and Operations DOI: 10.1080/15472450.2013.806753, 2014

- [4] Yu-Chiun Chiou, Lawrence W. Lan & Chun-Ming Tseng: A Novel Method to Predict Traffic Features Based on Rolling Self-Structured Traffic Patterns, Journal of Intelligent Transportation Systems, Technology, Planning, and Operations, DOI: 10.1080/15472450.2013.806764, 2014
- [5] Islam, M.K. ; Vandebona, U. ; Dixit, V.V. ; Sharma, A., A Bulk Queue Model for the Evaluation of Impact of Headway Variations and Passenger Waiting Behavior on Public Transit Performance, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, , Issue 6, Date Dec. 2014, Page(s): 2432 – 2442
- [6] Dzedzic F., Pałka M., Studnicki R., Wąs J.: Urbansim – symulator prędkości przemieszczania się w terenach zurbanizowanych, Zeszyty Studenckiego Towarzystwa Naukowego, 2012 nr 25 s. 95–99. Artykuły laureatów XLIX Sesji Studenckich Kół Naukowych Akademii Górniczo-Hutniczej pod red. Leszka Kurcza, Andrzeja Gołdasza, Kraków: Wydawnictwo Studenckiego Towarzystwa Naukowego. 2012
- [7] Wąs J., Bieliński R., Gajewski B., Orzechowski P., Problematyka modelowania ruchu miejskiego z wykorzystaniem automatów komórkowych, Automatyka: półrocznik Akademii Górniczo-Hutniczej, vol.13, 1207–1217, 2009
- [8] Bieliński R., Gajewski B., Modelowanie ruchu drogowego z zastosowaniem automatów komórkowych za pomoc zmodyfikowanego modelu Nagela-Schreckenberga. Praca magisterska AGH, promotor dr inż Jarosław Wąs, WEAlIE. 2009
- [9] Tokarski A. Symulacja ruchu drogowego metodami dyskretnymi i ciągłymi, Praca inżynierska AGH, promotor dr inż Jarosław Wąs, Informatyka, WEAlIB 2012.
- [10] Esser J, Schreckenberg M.: *Microscopic Simulation of Urban Traffic Based on Cellular Automata*, International Journal of Modern Physics, Vol. 8, No. 5, 1997, s. 1025-1036
- [11] B. Płaczek: A Traffic Model Based on Fuzzy Cellular Automata, Journal of Cellular Automata (ISSN: 1557-5969), vol. 8, 2013 s. 261-282,



[12] B. Płaczek: Input data selection for road traffic control systems  
Transport (ISSN: 0866-9546) , 24(2), 2012, s. 225-247

Archives of

Centrum Inteligentnych Systemów Informatycznych Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
budynek C-2 pokój 426 tel: 12 617 44 53 www.isi.agh.edu.pl isi@agh.edu.pl



Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego