

Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

Dane osobowe

dr inż. Krzysztof Małecki

Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- 2000 Politechnika Szczecińska, Wydział Informatyki, doktor nauk technicznych w dyscyplinie informatyka. Temat rozprawy doktorskiej: Minimalizacja funkcji logicznych w postaci form arytmetycznych. Praca została wyróżniona.
- 1997 Politechnika Szczecińska, Wydział Informatyki, magister inżynier informatyki, specjalność: systemy oprogramowania.

Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu na uczelni

- 2018 – obecnie Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Informatyki, Katedra Systemów Multimedialnych, stanowisko: adiunkt.
- 2013 – 2018 Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Informatyki, Katedra Systemów Multimedialnych, stanowisko: starszy wykładowca.
- 2009 – 2013 Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Informatyki, Katedra Architektury Komputerów i Telekomunikacji, stanowisko: adiunkt.
- 2003 – 2016 Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Gorzowie Wielkopolskim, Wydział Techniczny, stanowisko: starszy wykładowca, od 2012 stanowisko: docent.
- 2003 – 2009 Politechnika Szczecińska, Wydział Informatyki, Katedra Projektowania Układów Cyfrowych, stanowisko: adiunkt.

1997 – 2003 Politechnika Szczecińska, Wydział Informatyki, Katedra Projektowania Układów Cyfrowych, stanowisko: asystent.

Profile internetowe

Strona internetowa: kmalecki.zut.edu.pl

ORCID: 0000-0002-8687-1119

Scopus Author ID: 6506176448

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Krzysztof_Malecki2

GoogleScholar: Krzysztof Małecki

DBLP: <https://dblp.uni-trier.de/pers/hd/m/Malecki:Krzysztof>

Mendeley: <https://www.mendeley.com/profiles/krzysztof-malecki2/>

WoS (wyszukiwanie): Autor: *Malecki K* + Adres: *Szczecin*

Osiągnięcie naukowe

Jako osiągnięcie naukowe w dyscyplinie informatyka wskazuję cykl 11 powiązanych tematycznie publikacji pt.

Modelowanie i symulacja heterogenicznych systemów dyskretnych z wykorzystaniem klasycznych i grafowych automatów komórkowych oraz paradygmatu modelowania agentowego.

Cykl ten obejmuje 5 artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych z listy Journal Citation Reports oraz 6 artykułów wydanych w recenzowanych materiałach konferencyjnych wydawców takich jak: Springer oraz Elsevier, indeksowanych w bazie Web of Science. W skład cyklu publikacji wchodzi następujące prace:

- A1. Iwan S. [30%], **Małecki K. [70%]** (2017). Utilization of cellular automata for analysis of the efficiency of urban freight transport measures based on loading/unloading bays example. *Transportation Research Procedia*, vol.25, p. 1021-1035.
Czasopismo indeksowane w Web of Science i Scopus, 15 pkt. MNiSW, udział 70%.
Wkład autorski: opracowanie modelu automatu komórkowego służącego do analizy przepustowości drogi jednokierunkowej w obszarze rozlokowania zatoczek rozładunkowych i punktów rozładunku towarów, oprogramowanie przygotowanego modelu w formie mikrosymulatora, współpraca przy pisaniu artykułu.

- A2. Iwan S. [20%], Kijewska K. [25%], Johansen B.G. [5%], Eidhammer O. [5%], **Małecki K. [25%]**, Konicki W. [15%], Thompson R. [5%] (2018). Analysis of the environmental impacts of unloading bays based on cellular automata simulation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol.61, part A, p.104-117.

IF = 3.445, 35 pkt. MNiSW, udział 25%.

Wkład autorski: przygotowanie modelu automatu komórkowego, którego idea była przedstawiona w [A1] do wykonania badań eksperymentalnych dla danych rzeczywistych pozyskanych podczas realizacji projektu unijnego przez członków zespołu projektu UE, GRASS (wykaz dorobku, rozdz. II, sekcja J, poz. 2), współpraca podczas pisania artykułu.

- A3. **Małecki K. [100%]** (2018). Two-Way Road Cellular Automaton Model with Loading/Unloading Bays for Traffic Flow Simulation. In: Mauri G., El Yacoubi S., Dennunzio A., Nishinari K., Manzoni L. (eds) *Cellular Automata*. LNCS vol. 11115, p. 218-229. Springer, Cham.

Konferencja ACRI 2018 – Cellular Automata for Research and Industry.

Seria LNCS indeksowana w Web of Science i Scopus, 15 pkt. MNiSW, udział 100% (w dniu składania wniosku 0 pkt., ze względu na brak indeksacji w WoS; artykuł jest zaindeksowany w Scopus, Google Scholar i Dblp; zaznaczam, że wszystkie poprzednie edycje ACRI były indeksowane w WoS).

- A4. **Małecki K. [95%]**, Wątróbski J. [5%] (2017). Cellular Automaton to Study the Impact of Changes in Traffic Rules in a Roundabout: A Preliminary Approach. *Applied Sciences* 7(7), 742.

IF = 1.689, 25 pkt. MNiSW, udział 95%.

Wkład autorski: wiodący udział w opracowaniu koncepcji badań i ogólnej odpowiedzialności za projekt, dokonanie przeglądu literatury, opracowanie modelu automatu komórkowego i jego implementacja, wykonanie badań eksperymentalnych i krytyczna analiza wyników, pisanie artykułu i przygotowanie wersji końcowej.

- A5. **Małecki K. [100%]** (2017). The Use of Heterogeneous Cellular Automata to Study the Capacity of the Roundabout. In: Rutkowski L., Korytkowski M., Scherer R., Tadeusiewicz R., Zadeh L., Zurada J. (eds) *Artificial Intelligence and Soft Computing*. LNCS, vol. 10246, p. 308-317. Springer, Cham.

Konferencja ICAISC 2017 – Int. Conf. on Artificial Intelligence and Soft Computing.

Seria LNAI indeksowana w Web of Science i Scopus, 15 pkt MNiSW, udział 100%

- A6. **Małecki, K. [90%]**, Wątróbski, J. [5%], Wolski, W. [5%] (2017). A Cellular Automaton Based System for Traffic Analyses on the Roundabout. In: Nguyen N., Papadopoulos

G., Jędrzejowicz P., Trawiński B., Vossen G. (eds) Computational Collective Intelligence. ICCI 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol. 10449, p. 56-65. Springer, Cham

Seria LNCS indeksowana w Web of Science i Scopus, 15 pkt. MNiSW, udział 90%.

Wkład autorski: wiodący udział w opracowaniu koncepcji badań i ogólnej odpowiedzialności za projekt, dokonanie przeglądu literatury, opracowanie metody i aplikacji, opracowanie procedury badawczej i wykonanie badań; pisałem artykuł i przygotowałem wersję końcową; zaprezentowałem wyniki na konferencji.

- A7. **Małecki K. [100%]** (2017). Graph Cellular Automata with Relation-Based Neighbourhoods of Cells for Complex Systems Modelling: A Case of Traffic Simulation. *Symmetry* 9(12), 322.

IF = 1.256, 30 pkt. MNiSW, udział 100%.

- A8. **Małecki K. [100%]** (2018). A computer simulation of traffic flow with on-street parking and drivers' behaviour based on cellular automata and a multi-agent system. *Journal of Computational Science* 28, 32-42.

IF = 1.925, 30 pkt. MNiSW, udział 100%.

- A9. **Małecki K. [90%]**, Wątróbski J. [10%] (2017). The Classification of Internet Shop Customers based on the Cluster Analysis and Graph Cellular Automata. *Procedia Computer Science*, 112, 2280-2289.

Konferencja KES2017 – Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems.

Seria Procedia Computer Science indeksowana w Web of Science i Scopus, 15 pkt MNiSW, udział 90%.

Wkład autorski: opracowanie frameworka realizującego klasyfikację na bazie analizy skupień i grafowego automatu komórkowego, implementacja modelu w celu sprawdzenia koncepcji badań, analiza literatury i przeprowadzenie badań eksperymentalnych, pisanie artykułu i przygotowanie wersji końcowej.

- A10. **Małecki K. [34%]**, Jankowski J. [33%], Rokita M. [33%] (2013). Application of Graph Cellular Automata in Social Network Based Recommender System, In: Bădică C., Nguyen N.T., Brezovan M. (eds), Computational Collective Intelligence. Technologies and Applications, LNCS vol. 8083, p. 21-29, Springer, Berlin, Heidelberg.

Konferencja ICCI2013 – Int. Conf. on Computational Collective Intelligence.

Seria LNCS indeksowana w Web of Science i Scopus, 10 pkt MNiSW (2013); obecnie 15, udział 34%.

Wkład autorski: opracowanie modelu grafowego automatu komórkowego do analizy danych społecznościowych i modelowania powiązań pomiędzy węzłami

(użytkownikami sieci społecznościowej) na bazie fragmentarycznych danych rzeczywistych, współpraca przy pisaniu artykułu.

- A11. **Małecki K. [50%]**, Jankowski J. [40%], Szkwarkowski M. [10%] (2019). Modelling the Impact of Transit Media on Information Spreading in an Urban Space using Cellular Automata. *Symmetry* 11(3), 428. Special Issue: Information Technology and Its Applications.

IF = 1.256, 30 pkt. MNiSW, udział 50%.

Wkład autorski: ogólna odpowiedzialność za projekt, przegląd literatury w zakresie automatów komórkowych, opracowanie modelu klasycznego i grafowego automatu komórkowego do modelowania procesu dyfuzji informacji, zorganizowanie danych rzeczywistych, przeprowadzenie symulacji, współpraca przy pisaniu artykułu.

W Tabeli 1. przedstawiono sumarycznie wskaźniki bibliometryczne publikacji powiązanych z osiągnięciem naukowym.

Tabela 1. Wskaźniki bibliometryczne publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego.

Nazwa wskaźnika	Wartość
Sumaryczny wskaźnik Impact Factor	9.571
Suma punktów MNiSW zgodnie z rokiem wydania, bez poz. A3 ^{*)}	220
Suma punktów MNiSW według wkładu autorskiego, bez poz. A3 ^{*)}	163.4
Suma punktów MNiSW zgodnie z rokiem wydania, włączając poz. A3	235
Suma punktów MNiSW według wkładu autorskiego, włączając poz. A3	178.4

^{*)} pozycja A3 nie jest jeszcze zaindeksowana w WoS – wszystkie dotychczasowe edycje konferencji ACRI były indeksowane w WoS.

Działalność naukowa

Moje zainteresowania badawcze po obronie pracy doktorskiej na Politechnice Szczecińskiej w 2001 r. (przekształconej w 2009 r. w Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie) przekierowałem z dziedziny związanej z projektowaniem układów cyfrowych w stronę symulacji komputerowej i modelowania stochastycznych, heterogenicznych systemów dyskretnych oraz w stronę telematyki, w rozumieniu technologii informatycznych i systemów wspomagających użytkowników dróg i miast. Realizowane badania, w głównym nurcie moich zainteresowań, wpisują się w obszary informatyki uwzględnione w klasyfikacji ACM jako m.in. **metody obliczeniowe** (ang. *computing methodologies*), w obszarze

modelowania i symulacji (ang. *modeling and simulation*)¹. Wśród moich prac znajdują się też wyniki badań z obszaru uwzględnionego w klasyfikacji ACM jako **informatyka zorientowana na czynnik ludzki** (ang. *human-centered computing*). Badania realizowane w tym obszarze były związane z modelowaniem zachowania kierowców oraz systemów społecznościowych i procesów dyfuzji informacji. Początkowe badania (we wszystkich interesujących mnie obszarach) były publikowane w wydawnictwach krajowych. Następnie, wraz z tendencją umiędzynarodowiania badań, nastąpiło moje ukierunkowanie na wydawnictwa i konferencje międzynarodowe.

W badaniach wykorzystywałem m.in. rozwiązania zorientowane na modelowanie i symulację systemów składających się z **wielu różnorodnych obiektów** (dalej zwane **heterogenicznymi systemami dyskretnymi**), zarówno w obszarze symulacji ruchu drogowego (pojazdy o różnej wielkości i cechach własnych, tj. maksymalna prędkość, przyspieszenie, hamowanie) jak i zachowań użytkowników w sieciach społecznościowych (osoby o różnych cechach, upodobaniach, wykształceniu, predyspozycjach) oraz dyfuzji informacji (rozchodzenie się informacji w zróżnicowanej przestrzeni miejskiej). Podstawę formalną stanowiły modele bazujące na teorii automatów komórkowych wsparte teorią grafów i paradygmatem wielu agentów. Poza aspektem badawczym prace mają charakter stosowany i mogą być wykorzystane przez przedsiębiorstwa (publiczne lub prywatne) zajmujące się analizami i symulacjami ruchu drogowego, a także przez przedsiębiorstwa z branży internetowej zajmujące się analizami użytkowników korzystających z rozwiązań internetowych.

Inna ważna część moich badań oraz koncepcji związana jest z projektowaniem i prototypowymi realizacjami telematycznych systemów wspomagania kierowców. W tym obszarze zaproponowałem kilka koncepcji bazujących na technologii RFID (ang. *Radio-Frequency IDentification*) oraz sterownikach programowalnych, np. koncepcję strefy płatnego parkowania czy koncepcję rozpoznawania znaków drogowych, system czasu rzeczywistego dla modelowania przemieszczania się obiektów przez skrzyżowanie (na bazie sterowników, makiety rzeczywistej oraz własnego oprogramowania będącego wirtualnym symulatorem). Telematyka, w rozumieniu metod i narzędzi informatyki, jest coraz częściej stosowana w tzw. inteligentnych miastach (ang. *smart cities*). Wśród tych metod szeroko rozwijane są **metody i algorytmy przetwarzania obrazów**, sklasyfikowane według ACM jako obszar związany z **widzeniem komputerowym** (ang. *computer vision*). Idąc w tym kierunku, zorganizowałem bazę benchmarkową, składającą się z nagrań kilkudziesięciu osób wykazujących swoim zachowaniem oznaki charakterystyczne dla zmęczenia (przymykanie oczu, ziewanie, zasłanianie ust ręką, pocieranie oczu, itp.). Nagrania zostały pozyskane

¹ Association for Computing Machinery - Computing Classification System, 2012 Revision.
http://delivery.acm.org/10.1145/2380000/2371137/ACMCCSTaxonomy.html?ip=82.145.65.53&id=2371137&acc=OPEN&key=4D4702B0C3E38B35%2E4D4702B0C3E38B35%2E4D4702B0C3E38B35%2E6D218144511F3437&acm=1547742014_b1fd3265c7be05110f4fbfb167579880#_Toc320886574. Data dostępu: 20.01.2019.

z udziałem wielu różnych źródeł dostarczania danych (w paśmie widzialnym, mapy głębokości i termowizji dla wybranych obszarów ciała ludzkiego). Na tej podstawie wraz ze współpracownikami katedry, w której obecnie jestem zatrudniony, rozpoczęliśmy prace nad obserwowaniem faktów powstawania określonych wyrazów twarzy, mimiki oraz gestykulacji, w celu skutecznej oceny stanu psychofizycznego operatora pojazdu mechanicznego, przy zastosowaniu metod analizy obrazu, bez konieczności analizy danych biomedycznych. W wyniku tych prac zaczęły powstawać publikacje naukowe (trzy współautorskie artykuły przyjęte na konferencję CORES2019, ale jeszcze będące w fazie druku; z tego też względu prace te nie zostały uwzględnione w załączniku 3, stanowiącym wykaz dorobku).

Omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich wykorzystania

Mimo, że moje zainteresowania naukowe są rozległe, zasadniczym obszarem, w ramach którego zrealizowano cykl powiązanych publikacji, jest **modelowanie i symulacja**. Cel naukowy był dwojaki: (1) opracowanie metodyki modelowania i symulacji heterogenicznych systemów dyskretnych, (2) rozwój istniejących oraz opracowanie nowych modeli symulacyjnych dla wybranych przykładów heterogenicznych systemów dyskretnych. Skupiłem się na następujących zagadnieniach: modelowaniu i symulacji ruchu drogowego, modelowaniu zachowań użytkowników w sieciach społecznościowych i sklepach internetowych oraz modelowaniu dyfuzji informacji. Zaproponowałem modele ruchu oraz zachowań użytkowników na bazie klasycznych i grafowych automatów komórkowych, wspartych paradygmatem wielu agentów.

Wprowadzenie

Systemy dyskretnie charakteryzują się nieciągłymi zmianami stanów. Każda zmiana stanu systemu nazywana jest zdarzeniem². Jeśli zmienne opisujące elementy (obiekty) systemu mają charakter losowy a system jest dynamiczny, to mówi się o **stochastycznych, dyskretnych, zdarzeniowych systemach dynamicznych**³. Takie systemy najczęściej składają się z wielu elementów wzajemnie oddziałujących ze sobą. Dodatkowo, gdy elementy systemu są różnorodne (np. względem rozmiaru, właściwości, itp.), mówimy o systemach **heterogenicznych**. Każdy obiekt w systemie wraz ze swoimi właściwościami wpływa na zachowanie całego systemu, co powoduje, że często jedynym sposobem badania jest jakiś rodzaj **symulacji komputerowej**⁴. Symulacja to reprezentacja lub imitacja systemu, najczęściej w formie programu komputerowego, w celu określenia oraz przewidywania

² Banks, J., Carson, I. I., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2005). Discrete-event system simulation. Pearson.

³ Cassandras, C. G., & Lafortune, S. (2009). Introduction to discrete event systems. Springer Science & Business Media.

⁴ Law, A. M., Kelton, W. D., & Kelton, W. D. (1991). Simulation modeling and analysis. New York: McGraw-Hill.

zachowania tego systemu w określonych warunkach. Symulacja zdarzeń dyskretnych jest powszechnie stosowana w badaniach w celu badania dużych, złożonych systemów, które nie są odpowiednie do konwencjonalnego podejścia analitycznego.

Automaty komórkowe (CA – ang. *Cellular Automata*), które po raz pierwszy zostały wprowadzone przez von Neumanna i Ulama do modelowania biologicznej samo-reprodukcji⁵, to dyskretne systemy obliczeniowe, które odegrały znaczącą rolę w badaniu systemów złożonych⁶. Paradygmat CA wynika z podejmowanych przez badaczy prób opracowania pozornie skomplikowanych procesów w postaci szeregu prostych zdarzeń decyzyjnych⁷. Implementacja paradygmatu polega na podziale rozpatrywanej przestrzeni na zbiór komórek tworzących jednorodną siatkę. Decyzję na poziomie komórki podejmuje się za pomocą reguł przejściowych, które są funkcjami komórki i jej otoczenia, czyli komórek sąsiadujących. Każda komórka znajduje się w jednym ze skończonej liczby stanów. Sieć może mieć dowolną liczbę skończonych wymiarów. Jednak najczęściej używane są sieci jedno- lub dwuwymiarowe. Czas w modelu jest również dyskretny, a stan każdej komórki (obiektu układu) w czasie t zależy od stanów sąsiednich komórek. Sąsiadujące komórki to komórki będące w pewnej zależności z określoną komórką⁸. Ze względu na zastosowanie reguł w sposób iteracyjny proces CA pokrywa się z opisem globalnego zachowania systemu⁹. Wielokrotne wykorzystanie CA do modelowania różnych zadań pozwala uznać CA za dojrzały system obliczeniowy¹⁰.

Pojęcie deterministycznego CA jest zdefiniowane jako¹¹:

- 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: $s_i(t + 1) = F(\{s_j(t)\})$, $j \in O(i)$, gdzie $O(i)$ jest otoczeniem i –tej komórki.

⁵ Von Neumann, J., & Burks, A. W. (1966). Theory of self-reproducing automata. IEEE Transactions on Neural Networks, 5(1), 3-14.

⁶ Wolfram, S. (1984). Cellular automata as models of complexity. Nature, 311(5985), 419.

⁷ Wolfram, S. (2002). A new kind of science. Champaign, IL: Wolfram media.

⁸ Mamei, M., Roli, A., & Zambonelli, F. (2005). Emergence and control of macro-spatial structures in perturbed cellular automata, and implications for pervasive computing systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 35(3), 337-348.

⁹ Missoum, S., Gürdal, Z., & Setoodeh, S. (2005). Study of a new local update scheme for cellular automata in structural design. Structural and Multidisciplinary Optimization, 29(2), 103-112.

¹⁰ Wąs, J., & Sirakoulis, G. C. (2015). Cellular automata applications for research and industry. Journal of Computational Science, 11, 223-225.

¹¹ Kułakowski, K., (2000). Automaty komórkowe, OEN AGH, Kraków.

W niniejszym opracowaniu używam terminu **klasyczne CA**, co rozumiem jako automaty homogeniczne (jednorodne) i synchroniczne, tj. takie, w których wszystkie komórki stosują tę samą regułę lokalną i są aktualizowane synchronicznie. Termin ten stosuję, aby odróżnić taki rodzaj CA od innych form, np. niehomogenicznych i asynchronicznych CA (w których występują różne typy komórek i zastosowane są różne funkcje przejścia zmieniające stany wybranych komórek) lub grafowych CA.

Ograniczeniem klasycznych CA jest ich silne powiązanie z regularną, niezmienną w czasie siatką, co powoduje, że liczba sąsiadów każdej komórki jest zawsze stała i regularna. Z jednej strony jest to zaletą, jeśli modelujemy zjawiska, które można opisać taką siatką. Z drugiej strony **ogranicza to możliwość zastosowania CA w przypadku układów o zmiennych w czasie sąsiedztwach i relacjach pomiędzy obiektami**. Częściowym rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie automatów o zmiennej strukturze¹² lub nieregularnych sąsiedztwach¹³. **Proponowany przeze mnie grafowy automat komórkowy¹⁴ (GCA) stanowi nowe podejście łączące dynamikę sąsiedztw i ich relacji, ze zmienną strukturą i liczbą aktywnych komórek** (dokładne omówienie GCA znajduje się w mojej samodzielnej publikacji [A7]). Jednakże poniżej przytaczam moją definicję grafowego CA o sąsiedztwach relacyjnych (r -GCA), w celu przedstawienia pojęcia i jego interpretacji).

Zdefiniujmy zatem strukturalnie dynamiczny grafowy automat komórkowy o sąsiedztwach relacyjnych:

$$r - \text{GCA} = (S, d, Q, G, F_{r-\text{GCA}}, R_{rc}, F_{rcG}),$$

gdzie:

- d – wymiar w przestrzeni d – wymiarowej ($d \geq 1$) reprezentujący siatkę komórek CA;
- Q – stan aktywności automatu, który zależy od zbioru stanów aktywności q_i poszczególnych komórek;
- S – stan automatu, który zależy od zbioru stanów s_i poszczególnych komórek;
- G – skierowany graf ważony $G = (V, E, K)$, który jest zdefiniowany przez zbiór węzłów (wierzchołków grafu) V , zbiór krawędzi E , zbiór wag K i funkcję wagi krawędzi α . Funkcja α definiuje wagi krawędzi grafu G :

$$\alpha : E(G) \rightarrow K,$$

gdzie $K \in \mathbb{N}$ lub, bardziej ogólnie, $K \in \mathbb{R}$. Wagi są wartościami wskazującymi na znaczenie połączeń między wierzchołkami. W systemach, w których jest wiele wierzchołków połączonych ze sobą, nie wszystkie połączenia mają ten sam priorytet.

¹² Halpern, P. (1987). Structurally dynamic cellular automata. Complex Systems, (1), 503-527.

¹³ O'Sullivan, D. (2001). Graph-cellular automata: a generalised discrete urban and regional model. Environment and Planning B: Planning and Design, 28(5), 687-705.

¹⁴ Pojęcie graph-CA znane już było wcześniej (O'Sullivan, D. (2001)) i pojawiło się w kontekście modelowania przynależności gruntowej, a realizacja była odmienna w stosunku do proponowanej w niniejszym opracowaniu.

Na przykład w świecie rzeczywistym przejście z jednego miasta do drugiego może wymagać określonej ilości czasu lub energii; w świecie wirtualnym (w sieciach społecznościowych) użytkownik ma różnych „przyjaciół”, ale nie ma takich samych relacji z każdym z nich;

- F_{r-GCA} jest funkcją, która definiuje stan komórki automatu w czasie $t + 1$ i zależy od stanu tej komórki i jej sąsiedztwa w czasie t ;
- R_{rc} jest globalną regułą, która definiuje warunki aktywacji lub dezaktywacji komórek CA i reguły rekonfiguracji grafu (definiuje zestawy dodanych i usuniętych wierzchołków i krawędzi grafu G przez F_{rcG}) i zależy od stanu automatu S^t (który reprezentuje stany wszystkich komórek);
- F_{rcG} jest funkcją, która rekonfiguruje graf i aktywuje/dezaktywuje komórki na podstawie warunków ustawionych przez R_{rc} .

Automat r -GCA jest zdefiniowany przez skierowany graf ważony G i stan automatu S^t (w czasie t), co oznacza, że każdy wierzchołek $v_i \in V(G)$ grafu G odpowiada jednej komórce CA. Sąsiedztwo komórki tego CA jest zdefiniowane przez krawędzie grafu, które należą do zbioru wierzchołków $E(G)$, co oznacza, że dla każdego $v_i \in E(G)$ istnieje sąsiedztwo $N(v_i) = N_{in}(v_i) \cup N_{out}(v_i)$, co opisują krawędzie, wejściowe i wyjściowe tego wierzchołka:

$$N_{in}(v_i) = \{v_j | v_j v_i \in E(G)\},$$

$$N_{out}(v_i) = \{v_j | v_i v_j \in E(G)\}.$$

Zbiory wag krawędzi wejściowych $K_{in}(v_i)$ i krawędzi wyjściowych $K_{out}(v_i)$ grafu G dla sąsiedztw są zestawami wag krawędzi k_{ij} i k_{ji} , które należą do zestawu wag K , tak że krawędź, którą opisują, należy do zestawu krawędzi grafu G . Można je zdefiniować jako:

$$K_{in}(v_i) = \{k_{ij} | k_{ij} \in K \wedge v_j v_i \in E(G)\},$$

$$K_{out}(v_i) = \{k_{ji} | k_{ji} \in K \wedge v_i v_j \in E(G)\}.$$

Sąsiedztwo może być zdefiniowane przez macierz sąsiedztwa, a wagi skierowanych krawędzi można zapisać jako macierz wag. Macierze są strukturami, które można łatwo implementować w programie komputerowym i mogą przechowywać pewne informacje. Jeśli graf ma n wierzchołków, macierz sąsiedztwa $A(G)$ o rozmiarze $n \times n$ jest zbudowana w następujący sposób:

$$A(G) = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix},$$

gdzie $a_{ij} = 1$ dla $v_i v_j \in E(G)$ i $a_{ij} = 0$ dla $v_i v_j \notin E(G)$.

Dla grafu G macierz wag sąsiedztw $W(G)$ o rozmiarze $n \times n$ zawiera współczynniki wagowe poszczególnych krawędzi:

$$W(G) = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & \cdots & w_{nn} \end{bmatrix},$$

gdzie $w_{ij} = k_{ij}$ dla $v_i v_j \in E(G)$ oraz $w_{ij} = 0$ dla $v_i v_j \notin E(G)$, $k_{ij} \in K$.

Reguła lokalna F_{r-GCA} zależy od stanu komórki v_i , opisanej przez graf, a sąsiednie stany komórek, które na nią wpływają, są opisane przez sąsiedztwo $N_{in}(v_i)$; wpływ sąsiedztwa jest wyrażony przez wagę $K_{in}(v_i)$ krawędzi grafu, która opisuje każde sąsiedztwo w obrębie $N_{in}(v_i)$. Dlatego ogólnie można to przedstawić zależnością:

$$F_{r-GCA}(i, N_{in}(v_i), K_{in}(v_i)): s_i^t \rightarrow s_i^{t+1}.$$

Proponowany model, w przeciwieństwie do klasycznego CA, wykorzystuje dynamicznie zmieniające się sąsiedztwo relacyjne. Klasycznie rozumiane sąsiedztwo w CA to relacja między komórkami zlokalizowanymi w bezpośrednim otoczeniu w przestrzeni d –wymiarowej (siatka komórek CA). Jest to związane z regularnym rozmieszczeniem komórki CA w przestrzeni. W takim CA na stan komórki mają wpływ sąsiadujące komórki w jej środowisku, np. sąsiedztwo von Neumanna lub sąsiedztwo Moore'a.

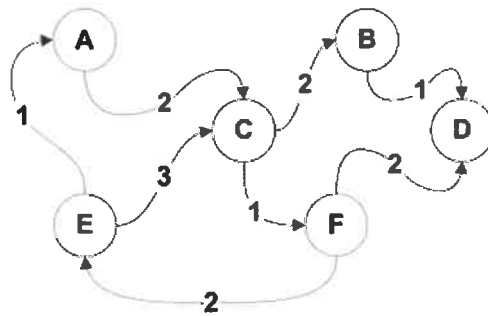
W przypadku r -GCA wymiar d nie ma już takiego samego znaczenia jak w klasycznym CA, ale nadal jest istotny dla implementacji modelu, np. w strukturach FPGA (ang. *Field-Programmable Gate Array*) lub w postaci programu komputerowego. W takim przypadku, w proponowanym r -GCA ten rodzaj sąsiedztwa nazywany jest fizycznym sąsiedztwem i definiuje strukturę regularnej siatki komórek. W proponowanym r -GCA stan komórki jest również określany na podstawie stanu tej komórki oraz stanów i relacji komórek sąsiadujących, ale w tym przypadku sąsiedztwo jest definiowane przez graf. Sąsiedztwo ma charakter logiczny: relacje należą do zbioru relacji (odpowiadających wagom krawędzi grafu) i nie są zależne od położenia komórek w siatce komórek. Ze względu na swój charakter połączenie logiczne nazywane jest **sąsiedztwem relacyjnym**. Zatem w prezentowanym podejściu mamy do czynienia z dwoma typami sąsiedztw:

- fizycznym – odpowiadającym sąsiedztwu komórek CA w przestrzeni d –wymiarowej, np. w przestrzeni miejskiej oraz
- logicznym – reprezentowanym przez zbiór powiązań relacyjnych (opisanych przez graf G , rekonfigurowalny w czasie), który umożliwia modelowanie systemu ze zmienną liczbą obiektów w czasie.

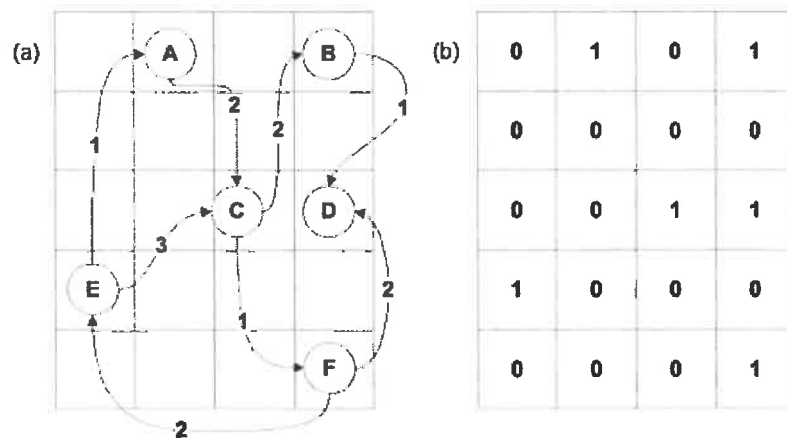
Ze względu na sąsiedztwo bazujące na relacji, wagi grafu odpowiadają relacjom między obiektami powiązаныmi z komórką (obiektem w modelowanym systemie). W szczególności taki związek może oznaczać:

- wszelkie relacje między obiektami reprezentowanymi przez wierzchołki grafu (np. relacja między pojazdami na drodze lub ludźmi w przestrzeni miejskiej, lub relacja między osobami zarejestrowanymi w sieci społecznościowej),
- odległość między obiektami reprezentowanymi przez wierzchołki grafu.

Dla przykładu relacje kilku obiektów systemu modelowanego przy pomocy r -GCA, opisane grafem przedstawionym na rysunku 1 odpowiadają sześciu komórkom (A, B, ..., F) automatu GCA. Mogą to być dowolne komórki z d –wymiarowej siatki komórek (np. z dwuwymiarowej siatki CA pokazanej na rysunku 2). W tym przypadku mamy do czynienia z trzema typami relacji zdefiniowanymi przez wagi z zestawu $K \in \{1,2,3\}$.



Rysunek 1. Przykład grafu opisującego relacyjne sąsiedztwo obiektów. Wierzchołki grafu odpowiadają komórkom CA.



Rysunek 2. Obiekty i odpowiednie relacje odwzorowane na komórki r -GCA: (a) graf obrazujący sąsiedztwa bazujące na relacji i (b) odpowiednia macierz aktywności komórek CA (1 – komórka aktywowana, 0 – komórka dezaktywowana).

Dynamiczną liczbę obiektów w systemie można modelować za pomocą r -GCA dzięki mechanizmom aktywacji i dezaktywacji poszczególnych komórek. W przestrzeni d aktywne są tylko komórki odpowiadające wierzchołkom grafu G :

$$q_i = \begin{cases} 1 & \text{jeśli } v \approx q_i \text{ istnieje} \\ 0 & \text{jeśli } v \approx q_i \text{ nie istnieje} \end{cases}, \text{ dla } v \in V(G).$$

Aktywność automatu Q zależy od zestawu stanów aktywności q_i poszczególnych komórek. W porównaniu do klasycznych CA tutaj jest również obecna reguła F_{rcG} , związana z konfiguracją struktury komórek i sąsiedztwem. Początkowa konfiguracja struktury komórek może zmieniać się w czasie poprzez:

- aktywację nieaktywnych komórek (co odpowiada dodaniu powiązanych wierzchołków do grafu),
- dezaktywację komórek (co odpowiada usunięciu wierzchołków grafu i połączonych z nimi krawędzi),
- dodawanie lub usuwanie krawędzi grafu, co powoduje tworzenie lub usuwanie relacji sąsiedzkich.

Ostatnim paradygmatem, którym wspierałem się w procesie modelowania heterogenicznych systemów dyskretnych, jest **paradygmat modelowania agentowego** (ang. *Agent-Based Modeling (ABM)*), który okazuje się być wartościowym uzupełnieniem i rozszerzeniem modelowania bazującego na CA. Jak wspomniałem powyżej, w klasycznym rozumieniu poszczególne komórki CA zmieniają swój stan na bazie prostych relacji zachodzących pomiędzy komórkami. W sytuacji, gdy dochodzi do konieczności podejmowania decyzji przez obiekty znajdujące się w komórkach, wydaje się logiczne przejście do modelowania dwu-poziomowego: poziom siatki CA oraz poziom podejmowania decyzji przez obiekty umiejscowione na siatce CA (poziom agentów). W takim przypadku ABM może pomóc w rozumieniu „dlaczego się coś dzieje” oraz „co by było, gdyby...”.

Analiza literatury oraz własne aspiracje sprawiły, że szczególnie zainteresowałem się dwoma obszarami, które posiadają cechy ww. systemów stochastycznych, heterogenicznych, dynamicznych, dyskretnych i zdarzeniowych. Są to zagadnienia związane z komputerowym modelowaniem ruchu drogowego, które zrealizowałem w formie modeli dwuwymiarowych [A1-A8]. Uzyskane wyniki i przemyślenia doprowadziły do podjęcia się także modelowania zachowań użytkowników w sklepach internetowych i sieci społecznościowej oraz modelowania dyfuzji informacji [A9-A11]. Zrozumienie ww. obszarów wymagało przeprowadzenia wielu często powtarzanych eksperymentów, co prowadziło do konieczności wykorzystania symulacji komputerowej.

Skrócony opis osiągnięcia

Budowa efektywnych metod oraz modeli i algorytmów służących do właściwego symulowania rzeczywistych zjawisk stawia wiele wyzwań. Z jednej strony dotyczą one opracowania poprawnych założeń do modelu i pozyskania danych, z drugiej strony dobrania właściwych metod rozwiązania problemu, a dodatkowo wymagają opracowania spójnej i efektywnej strategii rozwiązywania problemu z wykorzystaniem tych metod oraz sprawdzenia poprawności proponowanych rozwiązań. Prowadzone przeze mnie badania

obejmowały wszystkie z powyższych kierunków i **doprowadziły do zaproponowania kilkietapowej metodyki modelowania heterogenicznych systemów dyskretnych.**

W ramach badań, korzystając z opracowanej metodyki, **zaproponowałem i dokonałem implementacji wielu modeli** do symulowania systemów składających się z różnorodnych elementów, na bazie automatów komórkowych (CA), które dalej w omawianych pracach ewoluowały do postaci grafowych automatów komórkowych (GCA) oraz modelowania z wykorzystaniem paradygmatu wielu agentów (ABM). W pierwszych realizacjach wykorzystałem znaną wcześniej klasyczną koncepcję rozmiaru komórki CA równej rozmiarowi jednego z obiektów znajdujących się w symulowanym systemie, złożonym z wielu podobnych obiektów [A1-A3]. W kolejnym etapie badań opracowałem modele bazujące na zmniejszonych komórkach CA, które okazały się lepsze do odwzorowywania rzeczywistego charakteru modelowanego procesu. Tym samym umożliwiły one modelowanie heterogenicznych systemów, w których istnieją różne wielkościowo obiekty, o różnej charakterystyce fizycznej [A4-A6, A8]. Dodatkowo, łącząc koncepcję CA z klasyczną koncepcją grafów, uzyskałem strukturę GCA [A7], za pomocą której pokazałem możliwość modelowania heterogenicznych systemów dyskretnych, w których relacje pomiędzy obiektami są zmienne w czasie. Jako przypadki takich systemów rozważyłem modelowanie ruchu drogowego [A7], klasyfikację użytkowników sklepu internetowego [A9], modelowanie zachowań użytkowników w sieci społecznościowej [A10] oraz modelowanie dyfuzji informacji w przestrzeni miejskiej [A11]. Rozwój modeli bazujących na teorii automatów komórkowych i chęć uwzględnienia aspektu „myślenia przez obiekty” doprowadził do wykorzystania paradygmatu ABM [A8]. W trakcie powstawania wszystkich ww. prac rozważane były aspekty pozyskiwania danych oraz weryfikacji i walidacji opracowanych modeli i systemów.

Szczegółowy opis osiągnięcia

Celem tworzonych symulacji o charakterze inżynierskim, czyli takich, które zachowują zgodność z parametrami fizycznymi oraz poddawane są weryfikacji i walidacji, jest możliwie najdokładniejsze odwzorowanie rzeczywistych zachowań obiektów będących składowymi modelowanych systemów dyskretnych. Mowa tutaj o systemach stochastycznych, dyskretnych, zdarzeniowych i dynamicznych (SDEDS – ang. *Stochastic Discrete-Event Dynamic Systems*), w których zmiany stanów są inicjowane przez zdarzenia, przestrzeń stanów jest dyskretna, a zmienne mają charakter losowy.

Punktem wyjścia prowadzonych badań, w zakresie modelowania i symulacji ruchu drogowego, były idee pochodzące od wiodących zespołów naukowych, związane z zastosowaniem automatu komórkowego w dynamice ruchu drogowego, dla ruchu

w jednym kierunku na drodze jednopasmowej¹⁵ i na drodze dwupasmowej ze zmianą pasa¹⁶. Kolejni badacze wprowadzili stochastyczność w modelowaniu ruchu drogowego¹⁷, wprowadzając symetryczny zestaw reguł dla ruchu pojazdów zmieniających pas drogi oraz proponując model symetryczny i asymetryczny dla drogi dwupasmowej¹⁸. W dalszych badaniach pojawiła się heterogeniczność ruchu, czyli ruch mieszany z samochodami i rowerami¹⁹, gdzie autorzy zastosowali różne reguły przejścia dla różnych komórek CA imitujących różne pojazdy, nadal jednak zakładając, że każdy pojazd znajduje się w osobnej komórce. Początkowe badania związane z modelowaniem i symulacją ruchu drogowego dotyczyły analizy fizyki ruchu dla drogi jednokierunkowej i prostych skrzyżowań. W kolejnych pracach pojawiły się pierwsze podejścia do modelowania ruchu na rondach²⁰ wraz z symulacją możliwych punktów kolizyjnych²¹ oraz uczestnictwem pieszych²². Najnowsze badania ukierunkowane są także na modelowanie zachowania kierowców²³.

Punktem wyjścia prowadzonych badań, w zakresie modelowania sieci społecznościowych i relacji pomiędzy użytkownikami było opracowanie metody selekcji węzłów sieci i sugerowania użytkownikowi trafnych decyzji, na podstawie wyselekcjonowanych danych z tzw. szumu informacyjnego²⁴. Mowa o systemach rekomendacji (ang. *recommender system*)²⁵. Analiza historii zachowań użytkownika wpływa na określenie przez system rekomendujący, czy ma do dyspozycji informację binarną (użytkownik podjął określoną decyzję), czy informację złożoną (użytkownik podjął decyzję i wiąże się z nią jakaś jego ocena). Z racji tego, że coraz częściej mamy do czynienia z systemami współdzielenia się opiniami o naszych wyborach, umożliwiającymi ocenianie świadome lub subiektywne

¹⁵ Nagel, K., & Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de physique I*, 2(12), 2221-2229.

¹⁶ Nagel, K., Wolf, D. E., Wagner, P., & Simon, P. (1998). Two-lane traffic rules for cellular automata: A systematic approach. *Physical Review E*, 58(2), 1425.

¹⁷ Rickert, M., Nagel, K., Schreckenberg, M., & Latour, A. (1996). Two lane traffic simulations using cellular automata. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 231(4), 534-550.

¹⁸ Chowdhury, D., Wolf, D. E., & Schreckenberg, M. (1997). Particle hopping models for two-lane traffic with two kinds of vehicles: Effects of lane-changing rules. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 235(3-4), 417-439.

¹⁹ Vasic, J., & Ruskin, H. J. (2012). Cellular automata simulation of traffic including cars and bicycles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(8), 2720-2729.

²⁰ Wang, R., & Ruskin, H. J. (2002). Modeling traffic flow at a single-lane urban roundabout. *Computer Physics Communications*, 147(1-2), 570-576.

²¹ Echab, H., Lakouari, N., Ez-Zahraouy, H., & Benyoussef, A. (2016). Simulation study of traffic car accidents at a single lane roundabout. *International Journal of Modern Physics C*, 27(01), 1650009.

²² Echab, H., Ez-Zahraouy, H., & Lakouari, N. (2016). Simulation study of interference of crossings pedestrian and vehicle traffic at a single lane roundabout. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 461, 854-864.

²³ Zamith, M., Leal-Toledo, R. C. P., Clua, E., Toledo, E. M., & de Magalhães, G. V. (2015). A new stochastic cellular automata model for traffic flow simulation with drivers' behavior prediction. *Journal of computational science*, 9, 51-56.

²⁴ Pierce, J. R. (2012). *An introduction to information theory: symbols, signals and noise*. Courier Corporation.

²⁵ Ricci, F., Rokach, L., & Shapira, B. (2011). *Introduction to recommender systems handbook*. In *Recommender systems handbook* (pp. 1-35). Springer, Boston, MA.

(Facebook, Twitter), zagadnienie wydaje się istotne²⁶. Należy pamiętać, że systemy niejawne dają informacje bardziej rzetelne, natomiast w systemach jawnych większą aktywnością wykazują się osoby niezadowolone, co stanowi, że powstałe dane są obarczone błędem systematycznym. Analizując obszar modelowania relacji pomiędzy użytkownikami w sieciach społecznościowych [A10] i sklepach internetowych [A9] oraz dyfuzji informacji w przestrzeni miejskiej [A11], **staratem się wykazać globalną przydatność mojego podejścia (opracowanej metodyki i koncepcji grafowego CA).**

Powyżej przedstawione idee zostały w znacznym stopniu rozwinięte przeze mnie do postaci uogólnionych modeli delegowanych dla wyznaczonych zadań. Jednocześnie została **zaproponowana metodyka modelowania wybranych heterogenicznych systemów dyskretnych**, wspierając między innymi:

- zastosowanie nowych struktur reprezentujących modelowaną przestrzeń,
- uwzględnienie różnych paradygmatów modelowania dla wybranych zadań,
- zdefiniowanie całościowej koncepcji modelowania heterogenicznego ruchu na rondach, dla różnych scenariuszy sytuacyjnych,
- rozszerzenie koncepcji modelowania ruchu dla różnych klas pojazdów i różnych zachowań kierowców, uzyskane poprzez połączenie CA i paradygmatu modelowania agentowego,
- wprowadzenie pojęcia sąsiedztwa relacyjnego,
- zdefiniowanie grafowego automatu komórkowego (GCA) uwzględniającego sąsiedztwa fizyczne i relacyjne,
- sprawdzenie przydatności GCA w modelowaniu zadań należących do różnych dziedzin.

We wszystkich pracach, których wyniki przedstawiam w cyklu powiązanych tematycznie publikacji, kierowałem się zaproponowaną uogólnioną metodyką opracowywania modeli symulacyjnych, obejmującą kilka etapów: określenia klasy zadania i stosowanych paradygmatów, konfiguracji środowiska, konfiguracji schematów i scenariuszy, realizacji symulacji, generowania i analizy wyników oraz weryfikacji modelu i wykonanej symulacji. Poniżej przedstawiam szczegółowe rozwinięcie poszczególnych etapów.

Etap 1. Określenie klasy zadania i stosowanych paradygmatów.

Określenie klasy zadania jest podstawowym etapem proponowanej metodyki modelowania heterogenicznych systemów dyskretnych. W trakcie tego etapu należy zorientować się w istniejących modelach i metodach, określić wymiar modelowanej przestrzeni oraz określić

²⁶ Boyd, D. M., & Ellison, N. B. (2007). Social network sites: Definition, history, and scholarship. *Journal of computer-mediated Communication*, 13(1), 210-230.

paradygmat modelowania. Dla analizowanych przypadków modelowanie ruchu drogowego odbywało się w dwuwymiarowej przestrzeni i, poza paradygmatem CA, zastosowałem także paradygmat GCA oraz ABM. Modelowanie zachowań użytkowników w sieci społecznościowej oraz zachowań klientów sklepu internetowego wymagało rozważania zmieniających się relacji pomiędzy użytkownikami i pewnymi zależnościami, w kontekście czasu (wiele powiązań jednego użytkownika z innymi, którzy poprzez kolejne relacje uzyskują kolejne powiązania, często będące pewnymi sprzężeniami powodującymi powstawanie kolejnych i likwidowanie starych relacji). Z kolei modelowanie dyfuzji informacji w przestrzeni miejskiej wymagało wdrożenia koncepcji przekazywania informacji do obiektów znajdujących się w innej części miasta, a połączonych pewną relacją z obiektem generującym informację. Z tego względu proponuję przyjęcie zasady, że modelowanie układów jedno- lub dwuwymiarowych, w których obiekty zmieniają swój stan tylko poprzez prostą regułę przejścia (np. badania dotyczące fizycznych aspektów ruchu drogowego), należy analizować za pomocą CA (homogenicznych lub niehomogenicznych) [A1-A6], a układów, w których występują zależności relacyjne (sieci społecznościowe, rozprzestrzenianie się informacji lub zadania modelowania ruchu drogowego wykraczające poza zadania opisane prostymi regułami) za pomocą grafowych CA [A7, A9-A11]. Omówione klasy zadań powinny być wzbogacone paradygmatem ABM, w przypadku, gdy obiekty układu mają mieć zdolność podejmowania decyzji, czyli wykazują cechy inteligencji (np. zachowania kierowców, zachowania pieszych, itp.), co zaprezentowałem w publikacji [A8].

Etap 2. Konfiguracja środowiska.

Ten etap składa się z kolejnych kroków:

- **Dyskretyzacja środowiska** – w zależności od celu i zakresu symulacji proponuję określenie sposobu dyskretyzacji środowiska obejmującej wybranie rodzaju CA ze względu na: typ CA, rozmiar siatki, wielkość komórki w siatce, rodzaj sąsiedztwa dla obiektów w środowisku (sąsiedztwo fizyczne bądź relacyjne). Najbardziej klasyczny przypadek konfiguracji stosowany przez wielu autorów modelujących ruch drogowy (Nagel, Schadschneider, Knospe, Ruskin, Wang, Chopard) obejmuje siatkę prostokątną o długości dłuższego boku 7,5 metra, nie definiując dokładnie boku krótszego i przyjmując, że jest on równy ok. 2,5-3 m. Natomiast dla zagadnień modelowania sieci społecznościowych, rozprzestrzeniania informacji, rozprzestrzeniania chorób czy rozwoju miast autorzy opracowań przyjmują różne wielkości komórek CA, np. w zagadnieniach modelowania ruchu pieszych komórka jest kwadratem o boku 40 cm. Podążając za wytycznymi i bazując na swoich badaniach, proponuję zastosowanie standardowej siatki 7,5 x 3 m (dla ogólnych zagadnień opisujących ruch drogowy) [A1-A3], siatki o rozmiarze komórki 2,5 x 3 m (dla zagadnień modelowania ruchu drogowego w miastach, uwzględniających zróżnicowanie pojazdów oraz ich nominalnych prędkości) [A4-A6, A8] oraz

mniejszych komórek (np. 1 x 0.25 m) dla zagadnień, w których nawet niewielki ruch obiektów może mieć strategiczne znaczenie dla modelowanego układu (np. zagadnienia przesuwania się pojazdów w bok w celu ustąpienia miejsca, konflikty ciernie, powolne przemieszczanie się obiektów). Dalsze zmniejszanie rozmiaru siatki w zagadnieniach ruchu drogowego wydaje się bezcelowe, głównie w kontekście zwiększenia stopnia skomplikowania implementacji modelu. Jednak w zagadnieniach innych, np. modelowanie rozprzestrzeniania się informacji, czy przemieszczania się wirusów, chorób, itp. mniejsza siatka jest uzasadniona, a jej rozmiar należy traktować jako poziom szczegółowości opracowywanego modelu.

- **Określenie sposobu pozyskania danych** – w zależności od analizowanego przypadku, rozlokowanie obiektów oraz tendencje przemieszczania się obiektów w układzie mogą bazować na danych generowanych losowo [A1, A3, A5] lub danych rzeczywistych [A2, A4, A7-A11]. Ten ostatni przypadek określa się modelowaniem bazującym na danych (ang. *data-driven modelling*), a uzyskane wyniki mogą być weryfikowane i walidowane względem istniejących norm inżynierskich i branżowych.

Etap 3. Określenie scenariuszy symulacyjnych.

Na tym etapie opracowywane są scenariusze przemieszczania się obiektów w układzie i/lub interakcji z innymi obiektami. Mogą one być podyktowane potrzebą przeanalizowania różnych zasad i regulacji (np. normy prawne, zasady ruchu drogowego, trendy w postępowaniu kierowców) [A4, A8], różne relacje i ograniczenia w relacjach pomiędzy uczestnikami sieci społecznościowej [A9-A11]. W dalszej kolejności scenariusze mogą być wspierane drzewami decyzyjnymi lub metodami zaawansowanymi, np. wielokryterialnymi²⁷.

Etap 4. Realizacja symulacji.

Ten etap bazuje na inżynierskim rozwiązaniu zadania poprzez opracowanie założeń funkcjonalnych i niefunkcjonalnych dla przygotowywanego środowiska symulacyjnego. Na tym etapie dokonuje się projektu systemu i jego implementacji [A1-A11]. W zależności od potrzeb stosuje się różne techniki prezentacji (liczbowe lub wizualne), wsparte technologiami desktopowymi, mobilnymi lub internetowymi.

Etap 5. Generowanie i analiza wyników.

Etap ten obejmuje zaprojektowanie statystyk umożliwiających analizę i ocenę rozpatrywanego układu, ze względu na określone cele modelu i symulacji [A1-A11]. Warto tutaj odnieść się do wytycznych istniejących w literaturze (jeśli w obszarze danego zagadnienia takowe istnieją), w celu umożliwienia porównania wyników.

²⁷ Wątróbski, J., Małecki, K., Kijewska, K., Iwan, S., Karczmarczyk, A., & Thompson, R. (2017). Multi-criteria analysis of electric vans for city logistics. *Sustainability*, 9(8), 1453.

Etap 6. Weryfikacja modelu i symulacji.

Etap walidacji i weryfikacji opracowanych modeli to ważny element całego procesu modelowania i symulacji [A1-A11]. Składa się on z testowania komponentów wytworzonego systemu symulacyjnego, na bazie technik inżynierii oprogramowania, sprawdzenia funkcjonalności opracowanego modelu, sprawdzenia przyjętych założeń oraz wykonania walidacji i weryfikacji: (a) jakościowej (sprawdzenie, czy symulacja przebiega zgodnie z oczekiwaniami) i (b) ilościowej (porównanie do innych istniejących wyników).

Moje prace naukowe bazowały na przedstawionej powyżej metodyce. Realizując poszczególne etapy, dążyłem do rozwoju istniejących modeli symulacyjnych i opracowywania nowych, skuteczniejszych oraz bardziej realistycznych. Aby nie ograniczać się wyłącznie do modelowania i symulacji ruchu drogowego, podjąłem się wytwarzania modeli dla systemów uwzględniających czynnik ludzki, tym samym pokazując, że opracowana metodyka tworzenia modeli symulacyjnych oraz opracowana koncepcja GCA są przydatne w modelowaniu zadań należących do różnych klas.

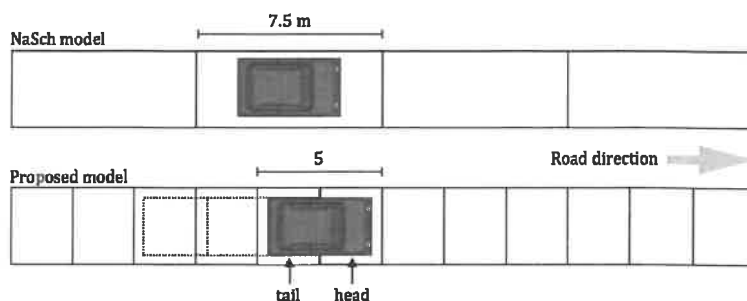
Swoje prace w zakresie modelowania i symulacji ruchu drogowego rozpocząłem od modyfikacji istniejących modeli. W publikacji²⁸ dokonałem rozszerzenia symulacyjnego modelu skrzyżowania dwóch dróg ze światłami²⁹ o rzeczywistą sytuację związaną z istnieniem pętli indukcyjnych. Zmodyfikowałem funkcję przejścia, dodając dodatkowe zależności w kroku związanym z hamowaniem pojazdu. Nadrzędnym celem było zaprezentowanie modelu, który nie dopuści do sytuacji „zakleszczenia”, tj. przypadku, gdy jadące pojazdy nie będą mogły opuścić skrzyżowania; zmienione zostanie światło i pojazdy oczekujące na drugiej drodze nie będą mogły ruszyć (czyli przypadek często spotykany w rzeczywistości). Zaproponowany model uniemożliwia zaistnienie takiej sytuacji, czyniąc ruch znacznie bardziej płynnym. W pracach [A1-A3] podjąłem się zadania **opracowania, po raz pierwszy, nowego modelu do symulowania ruchu drogowego w aspekcie istnienia zatoczek rozładunkowych i punktów rozładunku towarów**. Potrzeba takiego modelu zrodziła się w wyniku mojej współpracy z Wydziałem Inżynieryjno-Ekonomicznym Transportu Akademii Morskiej w Szczecinie. W pierwszej kolejności powstał teoretyczny model dla drogi jednokierunkowej [A1], który został poddany testom dla danych losowych. Pomyślna weryfikacja pozwoliła na sprawdzenie modelu na danych rzeczywistych (będących wynikiem pomiarów dokonywanych w mieście Szczecin, podczas realizacji unijnego projektu GRASS) i przeprowadzenie symulacji dla takich danych [A2]. W konsekwencji tego, że model spotkał

²⁸ Małecki, K., & Iwan, S. (2012). Development of cellular automata for simulation of the crossroads model with a traffic detection system. In International Conference on Transport Systems Telematics (pp. 276-283). Springer, Berlin, Heidelberg.

²⁹ Chowdhury, D., & Schadschneider, A. (1999). Self-organization of traffic jams in cities: Effects of stochastic dynamics and signal periods. Physical Review E, 59(2), R1311.

się z uznaniem środowiska badaczy zajmujących się transportem towarów, opracowałem kolejny model, tym razem dla ruchu dwukierunkowego [A3]. Istnieją plany aby także ten model został zastosowany do analizy aspektów środowiskowych w mieście Szczecin, na bazie danych rzeczywistych (publikacja jest w trakcie przygotowywania). Każdy z opracowanych modeli [A1-A3] zakłada istnienie dwóch rodzajów pojazdów (osobowy i dostawczy) i dwóch rodzajów miejsc rozładunku towaru, tj. zatoczki rozładunkowe znajdujące się na poboczu analizowanej drogi oraz punkty rozładunku umiejscowione na pasie drogi. Opracowanie modelu wymagało uwzględnienia wszystkich możliwych przypadków, tj. zatoczka lub punkt rozładunku są wolne lub zajęte, pojazd ciężarowy będzie/nie będzie parkował w zatoczce/punkcie rozładunku, pozostałe pojazdy przejeżdżają przez wolny punkt rozładunku lub omijają zajęty punkt rozładunku. Wszelkie zależności matematyczne oraz rysunki obrazujące ww. aspekty przedstawione są w publikacjach [A1, A3]. Wykonałem także aplikację symulacyjną, umożliwiającą sterowanie wieloma parametrami i obserwowanie omawianego zjawiska. Model i aplikacja odpowiadały na zapotrzebowanie zgłoszone przez partnerów reprezentujących środowisko logistyczno-transportowe.

Równoległe z pracami realizowanymi we współpracy z Akademią Morską w Szczecinie zająłem się modelowaniem ruchu na rondach. Ronda wydały się zagadnieniem niewystarczająco dobrze opracowanym w kontekście symulacji komputerowej. Nowym pomysłem było zaproponowanie i zastosowanie, **po raz pierwszy dla takiego zadania, mniejszych komórek automatu komórkowego, względem rozmiaru komórek proponowanych przez badaczy zajmujących się symulacją ruchu na drogach jednokierunkowych.** Zastosowałem komórki o wielkości 2,5 x 3 m, co spowodowało, że pojedyncze pojazdy były rozpatrywane na kilku komórkach [A4-A6]. W proponowanym modelu pojazd jest agentem zajmującym kilka komórek. Każdy samochód jest podzielony na dwie części: głowę (przód pojazdu) i ogon (pozostałe fragmenty). Głowa określa pozycję pojazdu na drodze; ogon określa długość pojazdu, co pozwala na mapowanie różnych typów pojazdów w strukturze komórkowej. W przypadku pojazdu osobowego o długości około 4,5 m zajmowane są dwie komórki; dla pojazdu towarowego o długości ok. 7 m – trzy komórki CA; w przypadku pojazdu ciężarowego o długości 10 m zajęte są cztery komórki CA, itd. Dzięki temu uzyskałem możliwość odzwierciedlenia heterogeniczności (różnorodności) symulowanych obiektów, względem ich długości. Rysunek 3 prezentuje tę zależność, w porównaniu do klasycznego modelu Nagela-Schreckenberga (NaSch), który zakłada stały rozmiar komórki o długości 7,5 m, reprezentującej cały pojazd wraz z otoczeniem, niezależnie od jego rzeczywistego rozmiaru.



Rysunek 3. Porównanie wielkości komórek CA zastosowanych w klasycznym modelowaniu ruchu drogowego, proponowanym przez Nagela oraz w moich pracach [A4-A6 i A8].

Nowe podejście umożliwiło bardziej precyzyjne odzwierciedlenie rzeczywistych prędkości przemieszczanych obiektów, zgodnych z prędkościami rzeczywistych pojazdów w ruchu miejskim (Tabela 2). Dodatkowo zaproponowałem bardziej złożone (w porównaniu do klasycznych) funkcje przejścia, składające się z większej liczby etapów, uwzględniających dodane elementy.

Tabela 2. Porównanie prędkości w modelu NaSch i prezentowanym podejściu (różnica wartości wynika z innego rozmiaru komórki w obu modelach).

Prędkość [$\frac{\text{komórki}}{\text{s}}$]	Rzeczywista prędkość zgodnie z modelem NaSch [$\frac{\text{km}}{\text{h}}$]	Rzeczywista prędkość w proponowanym podejściu [$\frac{\text{km}}{\text{h}}$]
0	0	0
1	26.8	8.9
2	53.6	17.9
3	80.4	26.8
4	107.1	35.7
5	133.9	44.6
6	160.7	53.6

Integralną częścią badań zaprezentowanych w pracy [A4] było również zaprojektowanie i przeprowadzenie eksperymentów obliczeniowych. Ich celem było wykazanie, w jakim stopniu zaproponowana strategia mniejszych komórek umożliwiła dokładniejsze niż dotychczas opisanie zachodzących zjawisk. Opracowałem cztery różne scenariusze bazujące na rzeczywistych regulacjach prawnych oraz jeden scenariusz będący propozycją nowych regulacji. Analiza wyników eksperymentu symulacyjnego pokazała, jaki wpływ na efektywność przemieszczania się obiektów (pojazdów) ma zastosowanie się użytkowników (kierowców) do istniejących regulacji prawnych (tj. przepisów ruchu drogowego). Uzyskane wyniki, poza publikacją w czasopiśmie Applied Sciences, były także prezentowane na dwóch konferencjach (ICAISC'2017 oraz ICCCI'2017), przy okazji dalszych badań realizowanych w tym obszarze [A5, A6]. Dla przykładu w publikacji [A6] reguła przejścia CA została wzbogacona o współczynniki hamowania pojazdu na drodze mokrej czy ośnieżonej, co

jeszcze bardziej urealniło symulację ruchu drogowego. Intensywna dyskusja pokazała, że temat jest aktualny, a opracowany model przyczynia się do lepszego zrozumienia zachodzących zjawisk.

Idąc dalej w kierunku modelowania układów heterogenicznych, zacząłem analizować problem innych zależności sąsiedztwa niż sąsiedztwo fizyczne, czyli bezpośrednie sąsiedztwo z najbliższymi komórkami. Nawiązując do modelowania ruchu drogowego, postawiłem sobie dwa pytania: Czy obecne modele uwzględniają relacje pomiędzy pojazdami znajdującymi się w pewnej odległości od siebie? Czy jest potrzeba analizowania takiej zależności i w jaki sposób można uwzględnić taką relację? Zagadnienie okazało się znacznie poważniejsze, gdy zacząłem rozważać zależność relacyjną pomiędzy obiektami w układach o większym stopniu złożoności (np. relacje pomiędzy użytkownikami sieci społecznościowej). Sięgnąłem do teorii grafów, gdyż założyłem, że nowa struktura powinna bazować na sprawdzonych algorytmach przeszukiwania przestrzeni. Ponieważ nie chciałem jednocześnie rezygnować z CA, zatem połączyłem obie te koncepcje. **Opracowałem strukturę grafowego CA (przedstawioną we wprowadzeniu)**, w której obiekty układu rozmieszczone są na siatce CA, ale stanowią jednocześnie węzły grafu [A7]. Zależności pomiędzy obiektami są opisane krawędziami tego grafu. Dzięki takiemu podejściu mogłem analizować wszystkie możliwe połączenia pomiędzy obiektami i jednocześnie przemieszczać te obiekty po ustalonej siatce CA, zgodnie z regułami przejścia. Zdefiniowałem zatem możliwe dwa rodzaje sąsiedztw: fizyczne (klasycznie rozumiane sąsiedztwo) oraz relacyjne (związane z pewnymi cechami, które powodują wzajemne oddziaływanie obiektów, niekoniecznie rozmieszczonych w bezpośredniej bliskości). Przydatność opracowanego mechanizmu rozpatrzyłem na przykładzie modelowania ruchu drogowego [A7], modelowania i klasyfikowania użytkowników sklepu internetowego [A9], modelowania sieci społecznościowej [A10] oraz modelowania dyfuzji informacji [A11]. W pierwszym analizowanym przypadku pomysł okazał się trafny, w kontekście wpływu na siebie pojazdów znajdujących się w dalszej odległości od siebie niż bezpośrednia odległość. Warto zaznaczyć, że w wyniku dużej złożoności obliczeniowej zaproponowanego mechanizmu uzyskiwanie wyników następuje w dłuższym czasie, choć nadal w czasie zbliżonym do rzeczywistego.

W artykule [A9] zrealizowałem **modelowanie upodobań (zachowań) klientów sklepu internetowego wraz z przewidywaniem ich poczynań**. Celem było opracowanie metody i frameworka umożliwiających szeroki zakres praktycznych możliwości, od początkowej klasyfikacji klienta do możliwości efektywnego dostosowania zestawu produktów promocyjnych, nawet dla nowych klientów, mając na uwadze różnorodność typów klientów i ich poczynań. Zaproponowałem strukturę wielowarstwową składającą się z: warstwy danych, technologii sklepu internetowego, warstwy metodologicznej i warstwy prezentacji wyników. Do klasyfikacji klientów sklepu internetowego wykorzystałem metodę analizy skupień. Do przewidywania poczynań klientów wykorzystałem grafowy CA. Całość była

wsparta bazą danych i przykładową realizacją sklepu internetowego. Początkowa struktura GCA była stworzona na bazie wyników uzyskanych we wcześniejszych badaniach zrealizowanych przez innych autorów, których prace zostały przytoczone w [A9]. Mechanizm opracowanego sklepu internetowego pozwolił na rejestrację zdarzeń wykonywanych przez poszczególnych klientów i przyczynił się do ich klasyfikacji. Im więcej zdarzeń było rejestrowanych, tym klasyfikacja była bardziej dokładna. Jednakże, aby precyzyjnie proponować (zgodnie z zainteresowaniami klientów) produkty promocyjne nowym klientom odwiedzającym sklep, wykorzystałem GCA. Pomysł polegał na tworzeniu grafu, którego węzłami były kolejne zdarzenia wykonywane przez nowego klienta. Wagi na krawędziach łączących węzły oznaczały zbieżność poczynąń z istniejącą klasyfikacją. Funkcja przejścia odwzorowywała możliwe kolejne zdarzenie, na bazie danych historycznych zgromadzonych w bazie danych. W przypadku zgodności klientowi wyświetlano reklamę określonego produktu promocyjnego, jak najbardziej dostosowanego do jego oczekiwań. Wstępne badania pokazały wysokie zadowolenie klientów, a system pozwolił na podział typów klientów na cztery heterogeniczne grupy: łowcy okazji (osoby, które starają się nabyć produkty po okazjonalnych cenach), śledzący nowinki (klienci, którzy starają się być na bieżąco z ofertą poszczególnych producentów), czerpiący przyjemność z odwiedzania sklepów internetowych (osoby spędzające czas wolny na przeglądaniu oferty bez nastawienia na konkretne zakupy), łowcy informacji (osoby, które porównują właściwości produktów, ceny oraz producentów przed dokonaniem zakupu). Proces modelowania został zrealizowany na bazie opracowanej i wcześniej omówionej metodyki, a dane były danymi rzeczywistymi uzyskanymi w procesie badania klientów przykładowego sklepu internetowego, którego klienci zgodzili się na udział w badaniu.

Moja koncepcja GCA została również wykorzystana w systemie rekomendującym wydarzenia dla użytkowników sieci społecznościowej [A10]. Celem tego badania było opracowanie modelu umożliwiającego ewaluację rekomendacji w sieci społecznościowej. Na bazie danych rzeczywistych (uzyskanych poprzez środowisko Facebook, w którym użytkownicy wyrazili zgodę na udział w badaniu i umożliwili dostęp do swoich danych), utworzone zostały grafy powiązań. Węzły grafów opisywały poszczególnych użytkowników wraz z ich heterogenicznymi cechami. W przypadku, gdy dwa węzły wykazywały zbieżność cech (np. użytkownicy ukończyli tę samą szkołę, studia, pracowali w tym samym miejscu, brali udział w takim samym wydarzeniu, itp.), to łączone były krawędzią, której waga opisywała stopień ich wzajemnej relacji. Analizowany system rekomendacji zapewniał powiadomienie o zbliżającym się wydarzeniu tylko dla użytkowników, których stopień relacji wskazywał na duże podobieństwo zainteresowań. Wejściem dla opracowanego modelu był fragment grafu, który stanowił kilkuprocentowy wycinek z całego grafu. Opracowałem reguły aktywacji i dezaktywacji węzłów w grafowym CA. Na tej podstawie następowało odtworzenie grafu bazowego. Skuteczność metody na bazie wyników symulacyjnych dla

wybranych wydarzeń została przedstawiona na wykresach i w tabelach w omawianym artykule [A10].

Ostatnim analizowanym heterogenicznym systemem dyskretnym, dla którego zastosowałem koncepcję opracowanego przez mnie GCA, było zjawisko modelowania procesu rozpowszechniania informacji, zainicjowanego przez reklamy znajdujące się na tramwajach [A11]. Wraz ze współautorami przygotowaliśmy system symulacyjny, bazujący na danych rzeczywistych. Dane o pojazdach (numer linii, liczba wagonów i aktualna pozycja geo-lokalizacyjna) były pobierane od zarządcy tramwajów w Szczecinie, co 15 sekund. Następnie, korzystając z serwisu GoogleMaps, wyświetlaliśmy na mapie poszczególne pojazdy, którym przypisane były reklamy. Środowisko symulowało ruch pieszych, którzy po zauważeniu pojazdu z reklamą przemieszczali się w różnych kierunkach. Na bazie znanych zależności dotyczących zapominania informacji oraz prędkości poruszania się pieszych w środowisku miejskim, modelowaliśmy dyfuzję informacji. Za pomocą klasycznego CA symulowaliśmy tradycyjne rozpowszechnianie informacji, tj. od źródła poprzez najbliższych sąsiadów do momentu zapomnienia informacji. Natomiast przy pomocy GCA symulowaliśmy zjawisko kampanii reklamowej inicjowanej siecią społecznościową i polegającej na przekazywaniu informacji o zauważonej reklamie swoim znajomym na profilu społecznościowym. Dla tego przypadku budowany był graf powiązań pomiędzy użytkownikami. Funkcja przejścia w GCA powodowała zmianę stanu komórek sąsiadujących z komórkami, które otrzymały informację o reklamie (i były w relacji z komórką inicjującą informację, bez konieczności przebywania w pobliżu przejeżdżającego pojazdu z reklamą). Potem następowało dalsze rozpowszechnianie informacji, choć w wielu przypadkach szybko stłumione brakiem możliwości przypomnienia o reklamie (osoby znajdowały się daleko od linii tramwajowej i nie widziały pojazdu z reklamą). W artykule [A11] znalazły się liczne wykresy, tabele i mapy cieplne pokazujące pokrycie terenu, dla miasta Szczecin, informacją reklamową inicjowaną przez transport publiczny. **Wynikiem naszej pracy było opracowanie nowatorskiego modelu symulacyjnego oraz systemu informatycznego, który może być wykorzystany przez firmy analityczne z branży reklamowej.**

We wszystkich ww. przypadkach [A7, A9-A11], opracowana koncepcja GCA okazała się doskonałym narzędziem wspomagającym proces modelowania i symulacji heterogenicznego systemu dyskretnego, w którym zauważona została zależność relacyjna pomiędzy obiektami.

Rozwiązując powyżej opisane problemy, zauważyłem, że proces modelowania heterogenicznego systemu dyskretnego może zostać znacznie wzbogacony, jeśli **poszczególne obiekty będą miały zdolność do podejmowania pewnych decyzji.** W ten sposób obiekt wykazuje elementy sztucznej inteligencji. Stąd pojawienie się wśród moich prac artykułu [A8] przedstawiającego powiązanie CA i paradygmatu ABM. Paradygmat ABM umożliwił przypisanie pewnych cech do poszczególnych obiektów analizowanego układu

oraz przypisanie tym obiektom pewnych ról. Natomiast siatka CA posłużyła jako ustalona przestrzeń umożliwiająca właściwe przesuwanie obiektów. W tym przypadku do modelu wdrożyłem klasyfikację kierowców, związaną ze sposobem reagowania na sytuację na drodze, w obecności parkingu zlokalizowanego wzdłuż ulicy. Bazując na wcześniejszych badaniach³⁰ i własnych obserwacjach, podzieliłem kierowców na cztery grupy: cierpliwi, niecierpliwi, spostrzegawczy i niespostrzegawczy. Każda grupa została zdefiniowana, a ich zachowania opisane zależnościami matematycznymi. Na tej podstawie przygotowałem symulator umożliwiający analizę badanych scenariuszy. Do symulatora zostały wprowadzone dane rzeczywiste pozyskane w wyniku badań drogowych przeprowadzonych w mieście Szczecin, dotyczące ilościowej charakterystyki pojazdów, w podziale na rozmiar pojazdu. Wyniki symulacji przedstawiłem na wielu wykresach. Warto tutaj zaznaczyć, że w omawianym artykule [A8], wzorem koncepcji zawartej w artykułach [A4-A6], także stosuję zmniejszony rozmiar komórek CA, co urealniło badania w kierunku modelowania ruchu w miastach.

Wkład w rozwój dyscypliny naukowej informatyka

Rezultaty przedstawione w cyklu powiązanych tematycznie publikacji mają wkład w rozwój informatyki, w szczególności w obszarze modelowania i symulacji stochastycznych, dyskretnych i zdarzeniowych systemów dynamicznych, złożonych z obiektów o różnych właściwościach, w aspektach związanych z modelowaniem i symulacją ruchu drogowego, sieci społecznościowych, sklepów internetowych i dyfuzji informacji.

Prowadzone przeze mnie prace wymagały interdyscyplinarnego podejścia, obejmującego między innymi: modelowanie i symulację systemów, teorię automatów komórkowych, teorię grafów, inżynierię oprogramowania, inteligencję obliczeniową, przetwarzanie równoległe, fizykę (w zakresie dynamiki ruchu) a także elementy psychologii (w zakresie zachowania użytkowników i kierowców). Efektem prac, które konsekwentnie prowadzę od 2010 roku, jest wypracowana całościowa metodyka modelowania i symulacji dyskretnych, heterogenicznych systemów na bazie automatów komórkowych, grafowych automatów komórkowych oraz podejścia agentowego. Realizowana metodyka znalazła zastosowanie w trakcie prac związanych z moją współrealizacją projektów unijnych (C-Liege, NOVELOG, GRASS) i kilku publikacji, w tym w czasopismach znajdujących się w bazie JCR.

Prowadzone prace potwierdzone są wieloma modelami symulacyjnymi, których działanie w rzeczywistych problemach zostało zaprezentowane w licznych publikacjach.

³⁰ Zamith, M., Leal-Toledo, R. C. P., Clua, E., Toledo, E. M., & de Magalhães, G. V. (2015). A new stochastic cellular automata model for traffic flow simulation with drivers' behavior prediction. *Journal of computational science*, 9, 51-56.

Zaproponowana przeze mnie koncepcja połączenia teorii automatów komórkowych i teorii grafów, znalazła zastosowanie w symulacji zjawisk zachodzących w różnych obszarach.

Opracowane przeze mnie modele oraz wyniki badań eksperymentalnych, w zakresie modelowania i symulacji ruchu drogowego, przyczyniły się do urealnienia komputerowej symulacji ruchu drogowego w miastach i umożliwiają lepsze poznanie zachodzących zjawisk i ich przyczyn. Natomiast badania prowadzone w zakresie modelowania i symulacji relacji pomiędzy użytkownikami w systemach społecznościowych pozwoliły na uzyskanie klasyfikacji użytkowników i właściwą eksploatację serwisów społecznościowych, które mogą być wykorzystane przy projektowaniu i analizie systemów internetowych. Pozyskane wyniki stanowią również wkład do rozwijającej się aktualnie obliczeniowej nauki o sieciach (ang. *computational network science*). Jest to nowa dziedzina wspomagająca analizę złożonych systemów naturalnych i sztucznych oraz badanie relacji między różnymi komponentami sieci jak również między wieloma sieciami³¹.

Podsumowanie

Tematem przewodnim, w ramach którego zrealizowałem swoje prace naukowe, jest modelowanie i symulacja systemów dyskretnych. Temat ten zrealizowałem w postaci wielu modeli symulacyjnych zaproponowanych do rozwiązywania zadań należących do kilku wybranych obszarów zastosowań.

Za najważniejsze osiągnięcia naukowe przedstawione w cyklu powiązanych tematycznie publikacji uznaję:

- zaproponowanie metodyki modelowania i symulacji heterogenicznych systemów dyskretnych, na bazie automatów komórkowych, grafowych automatów komórkowych i podejścia agentowego,
- rozwinięcie istniejących modeli symulacyjnych w zakresie modelowania ruchu drogowego,
- opracowanie nowych modeli symulacyjnych ruchu drogowego, uwzględniających warunki rzeczywiste,
- opracowanie uogólnionego modelu do symulacji ruchu na rondach wraz z opracowaniem scenariuszy prowadzenia badań,
- zdefiniowanie sąsiedztwa relacyjnego,
- opracowanie oryginalnej koncepcji połączenia teorii automatów komórkowych i teorii grafów w celu wytworzenia struktury grafowego automatu komórkowego, przydatnej do modelowania układów, w których zachodzi sąsiedztwo fizyczne oraz relacyjne; zaproponowana koncepcja znalazła zastosowanie w różnych dziedzinach

³¹ Hexmoor, H. (2014). *Computational Network Science: An Algorithmic Approach*. Morgan Kaufmann.

(modelowanie ruchu drogowego i modelowanie relacji pomiędzy użytkownikami sieci społecznościowych i sklepów internetowych oraz w modelowaniu dyfuzji informacji),

- przeprowadzenie wielu badań eksperymentalnych potwierdzających przyjęte założenia.

Rezultaty przedstawione w prezentowanym cyklu publikacji mają wkład w rozwój informatyki, w szczególności w obszarze modelowania i symulacji stochastycznych, dyskretnych systemów dynamicznych, złożonych z obiektów o różnych cechach.

Pozostała działalność naukowo-badawcza

Moja działalność naukowa rozpoczęła się w czasie czwartego roku studiów magisterskich (realizowanych w latach 1992-1997), kiedy to rozpocząłem pierwsze prace w Instytucie Informatyki Politechniki Szczecińskiej, pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Włodzimierza Szmerko, w kierunku teoretycznych aspektów projektowania układów cyfrowych. Pierwsze efekty prac zawarte zostały w pracy magisterskiej pt. „Opracowanie heurystycznego algorytmu do minimalizacji niezupełnych wielowartościowych funkcji logicznych w klasie wielomianów arytmetycznych” wykonanej pod kierunkiem prof. Szmerko. Praca magisterska została wyróżniona przez Komisję Egzaminu Dyplomowego.

Po ukończeniu studiów, w latach 1997-2000, pracowałem na stanowisku asystenta w Zakładzie Projektowania Układów Cyfrowych i Telekomunikacji na Wydziale Informatyki Politechniki Szczecińskiej i kontynuowałem działalność naukową w obszarze minimalizacji funkcji wielowartościowych oraz rozwoju systemów bankowych (jeden z kierunków, który mnie wtedy także interesował; a był realizowany przez pracowników zakładu, w którym wówczas pracowałem). Wyniki prac, w formie 21 artykułów, były prezentowane na wielu konferencjach międzynarodowych i krajowych. W roku 2000 obroniłem pracę doktorską pt. „Minimalizacja funkcji logicznych w postaci form arytmetycznych”. Praca została wyróżniona przez Radę Wydziału Informatyki PS na posiedzeniu w dniu 12 kwietnia 2000 roku.

Po uzyskaniu stopnia doktora moja działalność naukowa mocno spowolniła, co było związane, w znacznej mierze, z wyjazdem z Polski prof. Szmerko i rozwiązaniem zakładu (odejściem z zakładu osób, z którymi wcześniej współpracowałem). Pracując wciąż na Uczelni i chcąc jednocześnie sprawdzić swoje umiejętności w pracy pozauczelnianej, rozpocząłem pracę w banku na stanowisku doradcy ds. bankowości elektronicznej, gdzie zajmowałem się projektowaniem i wdrażaniem pierwszych rozwiązań bankowości elektronicznej w Polsce. Efektem tych prac, poza pracami inżynierskimi, jest kilka publikacji konferencyjnych dotyczących m.in. obiegu dokumentów, projektu Systemu Wymiany Danych i Rozliczeń Bankowych dla transakcji finansowych, a także projektu wspólnej platformy zajmującej się

internetową obsługą transakcji bankowych. Część z tych prac jest zaindeksowana w bazie Google Scholar.

W roku 2002 zostałem wybrany przez ówczesnego Dziekana Wydziału na stanowisko Prodziekana ds. Nauczania. Przerwałem pracę w banku i skupiłem się na pracach administracyjnych. Wydział Informatyki Politechniki Szczecińskiej rozwijał się dynamicznie i konieczne było wdrażanie nowych rozwiązań, nowych programów kształcenia i procedur funkcjonowania Wydziału, co udało się zrealizować. **Stanowisko prodziekana piastowałem przez dwie kadencje**, szukając, w wolnych chwilach, ciekawego obszaru badawczego.

Od roku 2008 zacząłem zmierzać w kierunku telematyki, czyli rozwiązań informatycznych, informacyjnych i telekomunikacyjnych oraz rozwiązań automatycznego sterowania, dostosowanych do potrzeb obsługiwanych systemów fizycznych. Zauważyłem, że problematyka ta wiąże się z kilkoma kolejnymi obszarami: symulacją komputerową, modelowaniem zdarzeń, w tym modelowaniem ruchu drogowego a także kształtowaniem infrastruktury inteligentnych miast. Aby być lepszym partnerem do współpracy w obszarze badawczo-rozwojowym, ukończyłem kurs programowania sterowników cyfrowych oraz kurs zarządzania projektami na bazie metodyk zwinnych (ang. *agile project management*). Podjąłem współpracę naukową z kolejnymi osobami. Powstało wiele koncepcji systemów, modeli i rozwiązań inżynierskich, tj. koncepcja wykorzystania technologii RFID w strefach płatnego parkowania, wykorzystanie technologii WiMax w miejskim transporcie publicznym, synteza sprzętowa i programowa symulatora sterowania ruchem pojazdów, synteza strukturalna algorytmu sterującego w sterownikach logicznych klasy micro. Na tym etapie rozwoju nie zawsze sprzyjało mi szczęście. Na przykład, w roku 2013 artykuł³² został opublikowany w czasopiśmie Przegląd Elektrotechniczny, które w dniu publikacji znajdowało się na liście A MNiSW. Niestety, na koniec roku kalendarzowego 2013 Ministerstwo opublikowało nową listę A, która objęła wszystkie prace z roku 2013 a ww. czasopismo zostało umieszczone w części B wykazu wspomnianej listy czasopism.

Rozwijając się w kierunku telematyki i modelowania systemów dyskretnych, podjąłem współpracę z zespołem dr. Stanisława Iwana z Wydziału Inżynieryjno-Ekonomicznego Transportu Akademii Morskiej w Szczecinie. Moja uwaga została skierowana na opracowywanie modeli symulacyjnych na potrzeby rozwiązywania zadań w zakresie zarządzania transportem towarowym i symulowania zachodzących zjawisk (wykaz dorobku, rozdz. II, sekcja J, poz. 1-4). Szczególnie przydatne okazały się modele bazujące na teorii automatów komórkowych i w konsekwencji na paradygmacie wielo-agentowym. Ważnym obszarem mojej aktywności w tej kooperacji było zaprojektowanie oraz implementacja środowiska wielo-agentowego umożliwiającego symulację i rozwiązywanie dynamicznych

³² Jaszcak, S., & Małecki, K. (2013). Hardware and software synthesis of exemplary crossroads in a modular programmable controller. *Przegląd Elektrotechniczny*, 89(11), 121-124.

problemów wyznaczania tras pojazdów dostawczych wraz z implementacją metod analizy zanieczyszczeń powietrza a także implementacja modelu, bazującego na teorii automatów komórkowych, do analizy i symulacji rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza spowodowanych miejskim transportem towarowym (wykaz dorobku, rozdz. II, sekcja F, poz. 2-3). Prace te były wykonywane w ramach projektów unijnych (NOVELOG, C-Liege) oraz projektu dofinansowanego przez NCBiR w ramach Norweskiego Mechanizmu Finansowego z Programu Polsko-Norweska Współpraca Badawcza. W ramach współpracy zrealizowaliśmy również założenia wynikające z projektu krajowego MNiSW – NCN OPUS, w którym to byłem odpowiedzialny za opracowanie informatycznych narzędzi wspomagających realizację gromadzenia i analizy danych pochodzących z heterogenicznych źródeł danych. Nasza współpraca trwa nadal i w sumie zaowocowała opublikowaniem ponad 20 prac, w tym znajdujących się w czasopiśmie z listy JCR^{33,34}.

Po uzyskaniu stopnia doktora, oprócz głównego nurtu badań przedstawionych w ramach jednotematycznego cyklu publikacji, jeden z obszarów badań prowadzonych przeze mnie dotyczył także zagadnień związanych z wielokryterialnym podejmowaniem decyzji. Był to obszar, którym zainteresowałem się w latach 2008-2010, opracowując np. model systemu ekspertowego ekstrakcji reguł decyzyjnych na potrzeby wyceny nieruchomości, ale także założenia do systemów wydobywania i analizy danych. Większość prac została opublikowana w postaci materiałów konferencyjnych, przeważnie nieindeksowanych. Nieliczne z tych prac zostały jednak zaindeksowane przez Google Scholar. Ta sfera pozwoliła mi nauczyć się kilku nowych rzeczy, co po wielu latach zaowocowało współpracą, w efekcie której w roku 2017 powstał artykuł dotyczący wielokryterialnej analizy danych związanych z logistyką miejską i pojazdami elektrycznymi, opublikowany w czasopiśmie z listy JCR³⁴.

Od roku 2013 włączyłem się w prace badawcze Katedry Systemów Multimedialnych, w której zacząłem wówczas pracować i pracuję do dnia dzisiejszego. W efekcie współpracy, opracowałem system rozpoznawania znaków drogowych bazujący na technologii RFID i wraz z doktorem Forczmańskim wykazaliśmy różnice w stosunku do wizyjnych systemów rozpoznawania znaków³⁵. Wspólnie z kilkoma pracownikami katedry opracowaliśmy metodykę pozyskiwania danych wielo-spektralnych dla celów opracowywania algorytmów rozpoznawania stanu zmęczenia operatorów pojazdów mechanicznych³⁶. Obecnie działania

³³ Iwan, S., Kijewska, K., Johansen, B. G., Eidhammer, O., Małecki, K., Konicki, W., & Thompson, R. G. (2018). Analysis of the environmental impacts of unloading bays based on cellular automata simulation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 104-117.

³⁴ Wątróbski, J., Małecki, K., Kijewska, K., Iwan, S., Karczmarczyk, A., & Thompson, R. (2017). Multi-criteria analysis of electric vans for city logistics. *Sustainability*, 9(8), 1453.

³⁵ Forczmański P., Małecki K. (2013) Selected Aspects of Traffic Signs Recognition: Visual versus RFID Approach. In: Mikulski J. (eds) *Activities of Transport Telematics. TST 2013. Communications in Computer and Information Science*, vol 395, p. 268-274. Springer, Berlin, Heidelberg.

³⁶ Małecki, K., Nowosielski, A., & Forczmański, P. (2017). Multispectral data acquisition in the assessment of driver's fatigue. In *International Conference on Transport Systems Telematics* (pp. 320-332). Springer, Cham.

są kontynuowane w kierunku opracowywania algorytmów i metodyk związanych z tymi zagadnieniami, a jednym z praktycznych rozwiązań jest opracowanie wbudowanego systemu automatycznego rozpoznawania osób w paśmie termowizyjnym (publikacja w trakcie przygotowywania).

Poza działalnością naukową prowadzę też **aktywną działalność dydaktyczną**, starając się angażować studentów w pracę naukową. Efektem tego jest **promotorstwo ponad 120** prac inżynierskich i magisterskich, kilkanaście wspólnych publikacji naukowych (w materiałach konferencyjnych, czasopismach krajowych i zagranicznych). Prowadziłem wykłady promujące informatykę wśród młodzieży szkół średnich. Od czterech lat jestem też **członkiem jury Ogólnopolskiego Konkursu Informatycznego** dla szkół podstawowych „Kodować każdy może”, promującego programowanie w języku Scratch.

Niezależnie od działalności naukowej i dydaktycznej **jestem aktywny na polu działań organizacyjnych**. Wyraża się to prowadzeniem prac wydziałowych skutkujących opracowaniem dwóch kompletnych programów nauczania dla kierunku Informatyka i ZIP (Zarządzanie i Inżynieria Produkcji), aktywnym udziałem w kreowaniu nowych treści programowych na studiach informatycznych oraz zaangażowaniem w nawiązywanie współpracy naukowo-badawczej z podmiotami zewnętrznymi. Przez wiele lat byłem Prodziekanem ds. Nauczania, członkiem Rady Wydziału Informatyki Politechniki Szczecińskiej, członkiem Senatu Politechniki Szczecińskiej, przewodniczącym Komisji Rekrutacyjnej, przewodniczącym Komisji Jakości Kształcenia, członkiem Komisji Programowej oraz piastowałem wiele innych funkcji (**pełen wykaz znajduje się w załączniku 3, rozdz. III, sekcja Q**).

Podsumowując. Na całość mojego dorobku naukowego, po uzyskaniu stopnia doktora, składają się prace nawiązujące do kilku, z pozoru rozłącznych, obszarów informatyki. Okazało się jednak, że wiedzę uzyskaną udało się połączyć, efektem czego jest powstanie wielu ciekawych koncepcji i implementacji. Obecna moja działalność naukowa skupiona jest jednak na dwóch podstawowych nurtach: modelowaniu i symulacji systemów dyskretnych (na bazie technik wynikających z teorii automatów komórkowych oraz paradygmatu wielu agentów) oraz algorytmach rozpoznawania obrazów (w zakresie rozpoznawania oznak wskazujących na zmęczenie osób w różnych modalnościach: pasmie widzialnym, termowizji oraz mapie głębokości).

Podsumowanie dorobku naukowego

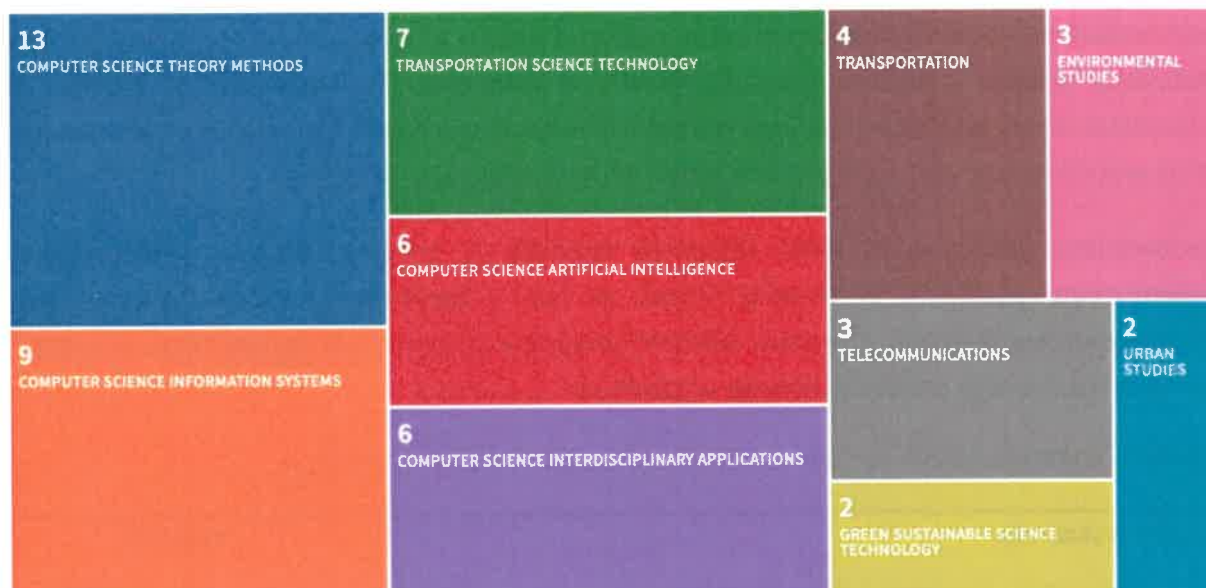
Jestem autorem oraz współautorem **89 prac opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora**. Szesnaście z nich to prace samodzielne, sześć prac zostało opublikowanych w czasopismach z listy Journal Citation Report (JCR) posiadających współczynnik Impact Factor (wśród nich dwie to prace samodzielne i jedna z udziałem większościowym, 95%). W tabeli 3

przedstawiłem wskaźniki bibliometryczne całości dorobku po uzyskaniu stopnia doktora (na podstawie wykazu publikacji przedstawionych w Załączniku 3), natomiast na rysunku 4 pokazałem wynik klasyfikacji mojego dorobku zaindeksowanego w bazie Web of Science (na bazie wyszukiwania według kryterium autor: *Malecki K* i adres: *Szczecin*).

Nadmieniam także, że w dniu składania wniosku o przeprowadzenie postępowania awansowego, posiadam w recenzji 5 prac, w tym 2 artykuły zgłoszone do czasopism znajdujących się w części A wykazu MNiSW (wszystkie te prace nie zostały ujęte w całości dorobku naukowego przedstawionego w tabeli 3).

Tabela 3. Wskaźniki całości dorobku naukowego po uzyskaniu stopnia doktora.

Nazwa wskaźnika	Wartość
Liczba publikacji w czasopismach z Impact Factorem	6
Sumaryczny wskaźnik Impact Factor	11.646
Index H według Web of Science	5
Index H według Scopus	7
Index H według Google Scholar	8
Liczba cytowań Web of Science (w tym bez autocytowań)	84 (51)
Liczba cytowań Scopus (w tym bez autocytowań)	118 (75)
Liczba cytowań Google Scholar	224
Liczba publikacji indeksowanych w bazie Web of Science	26
Liczba publikacji indeksowanych w bazie Scopus	27
Liczba publikacji indeksowanych w bazie Google Scholar	71
Liczba publikacji na konferencjach międzynarodowych	27
Liczba publikacji z listy B MNiSW	38
Liczba rozdziałów w monografiach	20
Sumaryczna liczba punktów MNiSW	723
Liczba punktów MNiSW według udziału własnego	434.84



Rysunek 4. Klasyfikacja mojego dorobku według bazy Web of Science (na dzień 04.04.2019).

Pełny dorobek naukowy, dydaktyczny, popularyzatorski i informacje o współpracy międzynarodowej przedstawiłem w Załączniku 3 (Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki).

04.04.2019
Krzysztof Małecki