

kpt. mgr inż. Mariusz Barański^{a)*}, dr hab. inż. Tadeusz Maciak, prof. PB^{b)}

^{a)}Komenda Powiatowa Państwowej Straży Pożarnej w Oławie / District Headquarters of the State Fire Service, Oława, Poland

^{b)}Politechnika Białostocka / Białystok University of Technology, Poland

*Autor korespondencyjny / Corresponding author: mariusz.baranski@straz.olawa.pl

Model ewakuacji wykorzystujący automaty komórkowe

An Evacuation Model Using Cellular Automata

Модель эвакуации с использованием клеточных автоматов

ABSTRAKT

Cel: Zapewnienie ludziom bezpieczeństwa podczas zgromadzeń i imprez masowych wymaga m.in. analizy warunków ewakuacji oraz właściwej organizacji ewakuacji w czasie zagrożenia. Modelowanie procesu ewakuacji to jeden z możliwych wariantów analizowania i planowania bezpiecznej ewakuacji zarówno z budynków, obiektów, jak i z terenu przeznaczonego na zorganizowanie imprezy. Celem artykułu jest zaprezentowanie praktycznego wykorzystania automatów komórkowych w modelowaniu ewakuacji oraz porównanie otrzymanych wyników z wynikami modelowania wykonanego dzięki wykorzystaniu oprogramowania komercyjnego. Dodatkowym celem pracy jest porównanie kosztu obliczeniowego modelowania ewakuacji przy zastosowaniu automatu komórkowego z kosztem obliczeniowym modelowania ewakuacji przy wykorzystaniu modelu *Social Force*.

Projekty i metody: Posłużono się automatem komórkowym z siatką o stałych wymiarach 0,5 x 0,5 m. Podstawowym założeniem dla modelu ruchu były wartości pół warstwy statycznej *Floor Field*, obliczane zgodnie z metryką euklidesową, oraz algorytmem zachłannym. Wyznaczono wartość parametru $\mu = 0,55$ określającą prawdopodobieństwo przejścia osoby do sąsiedniej komórki automatu. Implementację modelu wykonano w języku *Python*, korzystając z biblioteki do obliczeń naukowych *Numpy* i biblioteki matematycznej *Math*. Wyniki modelowania ewakuacji przy wykorzystaniu proponowanego modelu porównano z wynikami modelowania przy wykorzystaniu programu *FDS+Evac* dla pomieszczenia o wymiary 11,5 x 9 m z jednym wyjściem ewakuacyjnym i z dwoma wyjściami ewakuacyjnymi. Ponadto wykonano modelowanie i zestawiono uzyskane wyniki z wynikami programów *FDS+Evac*, *Pathfinder* oraz *TraffGo* zgodnie z testem Międzynarodowej Organizacji Morskiej (*International Maritime Organization – IMO*) IMO 9 dla 1000 osób.

Wyniki: Stwierdzono, że zarówno przy modelowaniu ewakuacji z pomieszczenia zaproponowanego przez autorów, jak i przy modelowaniu ewakuacji z pomieszczeń zaproponowanych w teście IMO 9 oszacowane czasy ewakuacji są zbliżone z czasami oszacowanymi przy wykorzystaniu programów mających zastosowanie w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. Ponadto wykazano, że zastosowanie automatu komórkowego przy modelowaniu ewakuacji 1000 osób pozwala na wykonanie modelowania 20-krotnie szybciej niż w przypadku modelu *Social Force* zaimplementowanego w programie *FDS+Evac*. Średni koszt modelowania 1 s ewakuacji przy wykorzystaniu automatu komórkowego zależy liniowo od liczby osób podlegających ewakuacji, inaczej niż to jest w przypadku modelu *Social Force*, w którym czas modelowania zwiększa się wykładniczo w stosunku do liczby osób.

Wnioski: Modele ewakuacji wykorzystujące automaty komórkowe, w przeciwieństwie do modelu *Social Force*, umożliwiają modelowanie ruchu dużych grup ludzi przy niższym koszcie obliczeniowym. Zastosowanie automatów komórkowych pozwala na wprowadzanie dodatkowych warstw wpływających na ruch ludzi przy niewielkim zwiększeniu się złożoności obliczeniowej. Wprowadzenie dodatkowych założeń i warstw do modeli opartych na automatach komórkowych umożliwi bardziej rzeczywiste odwzorowanie ewakuacji przy niewielkim wzroście kosztu zużycia zasobów sprzętowych. Ponadto narzędzia pozwalające na szybkie szacowanie czasu ewakuacji w przystępny dla inżynierów sposób byłyby pomocne w prawidłowym projektowaniu budynków. Obecnie komercyjne programy wymagają specjalistycznej wiedzy z zakresu modelowania. Zastosowanie prostego interfejsu z szybkim algorytmem szacowania czasu ewakuacji może przynieść wymierne korzyści w postaci poprawy bezpieczeństwa w projektowanych budynkach i obiektach budowlanych.

Słowa kluczowe: ewakuacja, modelowanie, szacowanie czasu ewakuacji, automat komórkowy, złożoność obliczeniowa

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

Przyjęty: 02.12.2016; Zrecenzowany: 22.02.2017; Opublikowany: 31.03.2017;

Procentowy wkład merytoryczny: M. Barański – 75%, T. Maciak – 25%;

Proszę cytować: BiTP Vol. 45 Issue 1, 2017, pp. 68–79, doi: 10.12845/bitp.45.1.2017.5;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-NC-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

ABSTRACT

Aim: The safety of people during meetings and public events requires an analysis of the conditions of evacuation and the proper organisation of escape in times of danger. Modelling the evacuation process is one of the options for analysing and planning the safe evacuation of the buildings, facilities and spaces during events. The aim of the article was to present the practical use of cellular automata for evacuation modelling and comparing the results with the results achieved using commercial software. Additionally, the objective of this work was to compare the cost of computational evacuation modelling of cellular automata with the "Social Force" model.

Project and methods: The authors used cellular automata on the grid with a fixed size of 0.5 m x 0.5m. The basic premise for the traffic model was the "Floor Field" static layer with Euclidean metric and the greedy algorithm. The determined value $\mu = 0.55$ indicated the probability of the transition of a person to the neighbouring automat cell. The implementation of the model was made in "Python", using the library for scientific computing "Numpy", and the maths library "Math". We compared the results of modelling the evacuation using the proposed model with the program "FDS + Evac" for room size 11.5 x 9 m with one and two emergency exits. Furthermore, the modelling was done and the results were juxtaposed with the results of the programs "FDS + Evac", "Pathfinder" and "TraffGo", using the example of a test of the International Maritime Organisation (IMO 9) covering the evacuation of 1,000 people.

Results: For both the evacuation modelling proposed by the authors and the IMO 9 test estimated evacuation times are consistent with the times estimated using programs applicable in fire-safety engineering. It was further found that the use of cellular automata for modelling the evacuation of 1,000 people allows modelling 20 times faster than in the "Social Force" model implemented in the "FDS + Evac" program. The average cost of modelling of 1 s of evacuation using cellular automata depends linearly on the number of persons subjected to evacuation, in contrast to the "Social Force" model, where the modelling time will increase exponentially with the number of people.

Conclusions: Evacuation models based on cellular automata, in contrast to the "Social Force" model, provide the ability to model the movement of large groups of people at a lower computing cost. The use of cellular automata allows the introduction of additional layers affecting the movement of people with a small increase in computational complexity. Introducing additional assumptions and layers to cellular automata models allow a more realistic representation of the evacuation with the small increase in the cost of the equipment used. Furthermore, a tool allowing fast estimates of the evacuation time in a manner accessible to engineers would help in the correct designing of buildings. Current commercial programs require expertise in the field of modelling. Using a simple interface with a fast algorithm estimating evacuation times can bring measurable benefits in terms of improving the safety of designed buildings and construction works.

Key words: evacuation, modelling, estimating evacuation time, cellular automata, computational complexity

Type of article: original scientific article

Received: 02.12.2016; Reviewed: 22.02.2017; Published: 31.03.2017;

Percentage contribution: M. Barański – 75%, T. Maciak – 25%;

Please cite as: BITP Vol. 45 Issue 1, 2017, pp. 68–79, doi: 10.12845/bitp.45.1.2017.5;

This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

АННОТАЦИЯ

Цель: Обеспечение безопасности людей во время массовых мероприятий и событий требует, среди прочего, анализа условий и правильной организации эвакуации во время возникновения опасности. Моделирование процесса эвакуации является одним из возможных вариантов анализа и планирования безопасной эвакуации, как из зданий и сооружений, так и с места предназначенного на проведение мероприятия. Целью данной статьи является представление практического использования клеточных автоматов при моделировании эвакуации и сравнение результатов с результатами моделирования, выполненного с помощью коммерческого программного обеспечения. Дополнительной целью исследования является сравнение расчетной стоимости моделирования эвакуации с использованием клеточного автомата с расчетной стоимостью моделирования эвакуации с использованием модели *Social Force*.

Проект и методы: Использован клеточный автомат с сеткой фиксированного размера 0,5 x 0,5 м. В качестве основных предположений модели движения были взяты значения половины статического слоя *Floor Field*, рассчитанные в соответствии с евклидовой метрикой и скучным алгоритмом. Определено значение величины $\mu = 0,55$, представляющее вероятность перехода человека к смежной клетке автомата. Реализация модели была сделана на языке *Python*, с использованием библиотеки для научных вычислений *Numpy* и математической библиотеки *Math*. Результаты моделирования эвакуации с использованием предложенной модели были сравнены с результатами моделирования с использованием программы *FDS + Evac* для помещения размером 11,5 x 9 м с одним аварийным выходом и двумя аварийными выходами. Кроме того, проведено моделирование и сравнение полученных результатов с результатами использования программы *FDS + Evac*, *Pathfinder* и *TraffGo* в соответствии с испытанием Международной морской организации (*International Maritime Organization – IMO*) IMO 9 для 1000 человек.

Результаты: Установлено, что при использовании модели эвакуации с помещения, предложенной авторами, как и при использовании моделирования эвакуации из помещения, предложенного в исследовании IMO 9, расчетное время эвакуации совпадает с расчетным временем при использовании программ, которые применяются инженерами пожарной безопасности. Кроме того, было показано, что использование клеточного автомата моделирования эвакуации 1000 людей позволяет выполнять эвакуацию в 20 раз быстрее, чем в случае модели *Social Force*, реализованной в программе *FDS + Evac*. Средняя стоимость моделирования 1 секунды эвакуации с использованием клеточного автомата линейно зависит от числа лиц, подлежащих эвакуации, иначе, чем в случае с моделью *Social Force*, в которой время моделирования увеличивается в геометрической прогрессии к числу лиц.

Выводы: Модели эвакуации с использованием клеточных автоматов, в отличие от модели *Social Force*, позволяют моделировать движение больших групп людей при более низкой расчетной стоимости. Применение клеточных автоматов позволяет вводить дополнительные слои, влияющие на передвижение людей с небольшим увеличением расчетной сложности. Введение дополнительных предположений и слоев моделей, основанных на клеточных автоматах, позволяет реалистичнее представлять эвакуацию при небольшом увеличении стоимости использования ресурсов аппаратного обеспечения. Кроме того, инструменты для быстрой оценки времени эвакуации в доступной форме для инженеров были бы полезны при правильном проектировании зданий. В настоящее время коммерческие программы требуют специальных знаний моделирования. Использование простого интерфейса с быстрым алгоритмом оценки времени эвакуации может принести ощутимую пользу в плане повышения безопасности проектируемых зданий и сооружений.

Ключевые слова: эвакуация, моделирование, расчет времени эвакуации, клеточный автомат, вычислительная сложность

Вид статьи: оригинальная научная статья

Принята: 02.12.2016; Рецензирована: 22.02.2017; Опубликована: 31.03.2017;

Процентное соотношение участия в подготовке статьи: M. Barański – 75%, T. Maciak – 25%;

Просим ссылаться на статью следующим образом: BITP Vol. 45 Issue 1, 2017, pp. 68–79, doi: 10.12845/bitp.45.1.2017.5;

Настоящая статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией CC BY-NC-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

Wstęp

Zapewnienie ludziom bezpieczeństwa podczas wszelkiego rodzaju zgromadzeń i imprez jest poważnym problemem. W działania zabezpieczające zaangażowanych jest wiele instytucji, służb i organów administracji publicznej [1]. Ważną rolę odgrywają tutaj wszelkiego rodzaju symulacje komputerowe, które pozwalają ocenić możliwości bezpiecznej ewakuacji z danych obiektów. Stosunkowo duże problemy sprawia odwzorowanie zachowania się ludzi w postaci modeli komputerowych, co wynika ze złożoności ludzkich postaw [2]. Obecnie modelowanie zachowania się tłumu może odbywać się zgodnie z podejściem makroskopowym, w którym tłum traktowany jest całościowo, a wchodzące w jego skład jednostki są jednorodne, lub zgodnie z podejściem mikroskopowym, w którym tłum traktowany jest jako zbiór zróżnicowanych i indywidualnych jednostek [3]. W ostatnich latach w modelowaniu zachowania się tłumu najpopularniejsze stały się modele mikroskopowe; wyparły one modele makroskopowe. W ramach podejścia mikroskopowego można wyróżnić modele oparte na: systematach agentowych, automatach komórkowych oraz metodach dynamiki molekularnej [4, 5, 6, 7]. Wśród wymienionych metod duże znaczenie zaczyna odgrywać model oparty na automatach komórkowych, a dokładniej – na automatach niehomogenicznych (niejednorodnych) [8, 9, 10]. Niehomogeniczne automaty komórkowe stosowane do modelowania ewakuacji:

- mają znacznie niższą złożoność obliczeniową niż modele oparte na systematach agentowych czy metodach dynamiki molekularnej,
- mają prostą implementację,
- umożliwiają modelowanie rozległych przestrzeni bez dużego obciążania pamięci,
- ze względu na proste reguły nie powodują błędów numerycznych i artefaktów obliczeniowych.

Pomimo wymienionych zalet automaty komórkowe mają również wady. Podczas modelowania ewakuacji może występować zjawisko zatykania (*clogging*) [11]. Jest ono w mniejszym lub większym stopniu wadą każdego modelu ewakuacji. Problem ten wymaga wprowadzenia odpowiednich założeń do modelu, które pozwolą ograniczyć zjawisko zatykania podczas swobodnego przemieszczania się ludzi w dwóch przeciwnych kierunkach. Inną wadą automatów komórkowych jest to, że bardzo trudno dzięki nim modelować tłum o zmiennej gęstości. W tym przypadku możliwe jest zastosowanie siatki automatu o zmiennych wymiarach lub kilku warstwach z siatkami o różnych wymiarach. Zagadnienie odwzorowania szerokiego zakresu gęstości rozmieszczenia osób przy wykorzystaniu automatów komórkowych wraz z walidacją wyników podjęto między innymi w publikacji [12].

W poniższym opracowaniu przedstawiono zastosowanie teorii automatów komórkowych w modelowaniu ewakuacji. Zastosowany model bazuje na warstwie statycznej znanego modelu *Floor Field* [4] i na odwróconej metryce euklidesowej. Algorytm aktualizacji stanu automatu podejmuje decyzje lokalnie optymalne – według algorytmu zachłannego. Algorytm zachłanny należy do dziedziny sztucznej inteligencji. Dzięki niemu można dokonać najlepiej rokującego w danym kroku czasowym wyboru

rozwiązania częściowego. Modelowanie przeprowadzono dla pomieszczenia z jednym wyjściem ewakuacyjnym i z dwoma wyjściami ewakuacyjnymi zgodnie z testem IMO 9 dla 1000 osób w jednym pomieszczeniu [13]. Oszacowane czasy ewakuacji porównano z czasami uzyskanymi przy zastosowaniu wybranych programów komercyjnych mających dokumentację weryfikacji. Porównano również czas procesora potrzebny do wykonania modelowania. Wykazano, że zastosowanie automatów komórkowych pozwala na modelowanie ewakuacji przy niewielkim koszcie pracy procesora. Dla proponowanego modelu czas obliczeń jest proporcjonalny do liczby osób poddawanych ewakuacji z pomieszczenia. Zastosowanie automatów komórkowych w modelowaniu ewakuacji umożliwia modelowanie ewakuacji bardzo dużych grup ludzi bez konieczności stosowania silnych komputerów obliczeniowych.

Proces ewakuacji

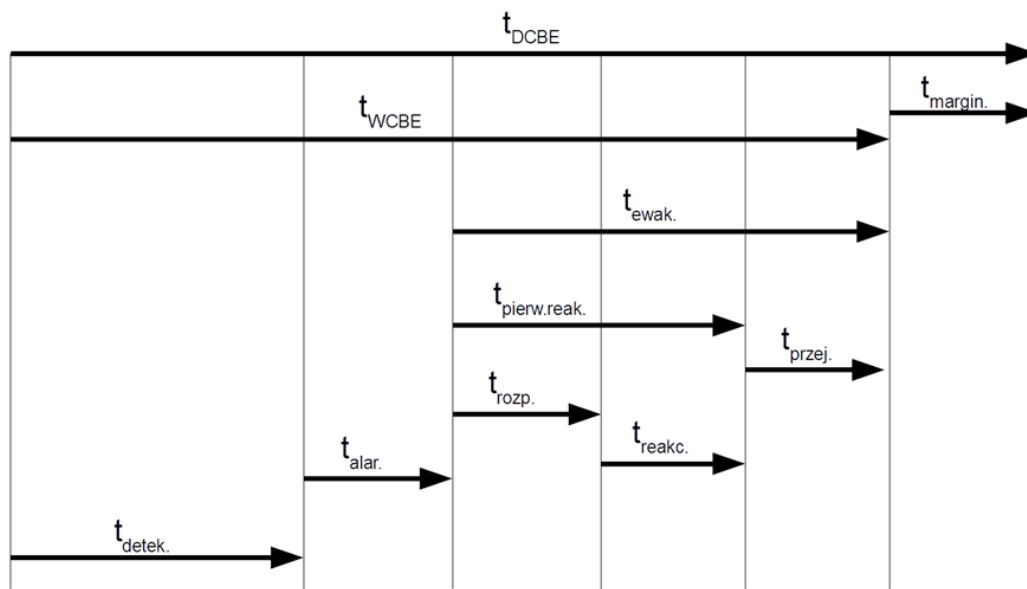
Dostępny i wymagany czas bezpiecznej ewakuacji

Zajmując się procesem ewakuacji, należy przywołać podstawowe definicje takich pojęć, jak: dostępny czas bezpiecznej ewakuacji (DCBE), wymagany czas bezpiecznej ewakuacji (WCBE) i margines bezpieczeństwa. Pojęcia te definiuje między innymi norma brytyjska *Published Document 7974-6* [14]. Dostępny czas bezpiecznej ewakuacji określa moment osiągnięcia temperatury pożarowych gazów równej 60°C oraz zasięgu widzialności w warstwie podsufitowej na wysokości do 1,8 m [15]. Czas ten rozpoczyna się z chwilą powstania pożaru i zależy głównie od: jego mocy, rodzaju produktów spalania, wentylacji strefy spalania, geometrii pomieszczeń, zastosowanych systemów przeciwpożarowych ograniczających rozwój pożaru itp.

Natomiast wymagany czas bezpiecznej ewakuacji składa się z kilku krótszych odcinków czasu zależnych od zaistnienia określonych zdarzeń. Proces szacowania wymaganego czasu ewakuacji przy zastosowaniu normy *Published Document 7974-6* autorzy przedstawili w opracowaniu [16]. Pierwszym odcinkiem jest czas detekcji pożaru. Może to być czas wykrycia pożaru przez system sygnalizacji pożaru (w większości przypadków jest to alarm drugiego stopnia) lub moment, w którym to użytkownik budynku wykryje pożar i ręcznie wciśnie ostrzegacz przeciwpożarowy. Drugim odcinkiem jest czas alarmowania, który jest czasem ogłoszenia alarmu lub komunikatu przez dźwiękowy system ostrzegawczy. Czas detekcji i czas alarmowania zależą od jakości systemu wykrywania i sygnalizacji pożaru. Trzecim odcinkiem jest czas rozpoznania. To etap, na którym osoby znajdujące się w budynku rozpoznają, jakiego rodzaju jest ogłaszany alarm i jakie działania powinny po jego usłyszeniu podjąć. Czas ten jest różny w zależności od grupy ludzi przebywających w budynku (na podstawie rodzaju grupy określa się tzw. kategorie zachowań ludzkich). Zależy on również od wprowadzonego w budynku poziomu bezpieczeństwa. Czwartym odcinkiem jest czas pierwszych reakcji ludzi po rozpoznaniu rodzaju alarmu. Wtedy to podejmowane są przede wszystkim takie czynności, jak: pakowanie osobistych rzeczy, wyłączanie obsługiwanego sprzętu czy zabezpieczanie opracowywanych dokumentów. Czas rozpoznania i czas pierwszych reakcji

zależą od stanu psychofizycznego ewakuowanych osób oraz od stopnia ich wyszkolenia. Piątym i ostatnim odcinkiem jest czas przejścia, kiedy to ludzie przechodzą drogami ewakuacyjnymi i opuszczają zagrożoną strefę przez wyjście ewakuacyjne prowadzące na zewnątrz budynku lub do innej bezpiecznej strefy pożarowej. Czas przejścia zależy od długości i szerokości drogi ewakuacyjnej oraz od zdolności osób do pokonywania odległości. Możliwe jest wpływanie na ten czas dzięki zmianie układu

dróg ewakuacyjnych, organizacji ewakuacji i liczby osób znajdujących się w budynku. Regularne próby ewakuacji oraz szkolenia z zakresu ochrony przeciwpożarowej mogą przyczynić się do skrócenia czasu rozpoznania, czasu pierwszych reakcji oraz czasu przejścia [17,18]. Szacowanie czasu przejścia drogami ewakuacyjnymi jest niezbędne w procesie projektowania budynków, projektowania dróg ewakuacyjnych i określania przeznaczenia poszczególnych pomieszczeń w budynku.



Rycina 1. Składowe wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji

Figure 1. Components of the required safe evacuation time

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [14].

Source: Own elaboration based on [14].

Różnica między dostępnym a wymaganym czasem bezpiecznej ewakuacji jest tzw. marginesem bezpieczeństwa. Margines bezpieczeństwa pozwala na zachowanie bezpiecznych warunków podczas wydłużenia się którejkolwiek ze składowych wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji. Proponowany model ewakuacji w założeniu dokonuje oszacowania czasu przejścia drogami ewakuacyjnymi ($t_{przej.}$).

Podstawowe parametry charakteryzujące ruch osób podczas ewakuacji

Przemieszczanie się ludzi podlega określonym prawom. Jednym z podstawowych parametrów opisujących to zjawisko jest prędkość przemieszczania. Podczas ewakuacji jest ona indywidualna dla poszczególnych osób i zależy od wielu czynników. Podstawowym czynnikiem jest zdolność osoby do przemieszczania się z określoną dla niej optymalną (najmniej energochłonną) i maksymalną prędkością, która zależy od płci, wieku oraz stanu psychofizycznego człowieka [19, 20]. Omawiana prędkość ma rozkład Gaussa o wartości średniej 1,32 m/s i odchyleniu standardowym równym 0,26 m/s [21]. W literaturze można znaleźć również inne wartości, tj. wartość średnią 1,24 m/s oraz odchylenie standardowe 0,15 m/s [22].

Innym parametrem opisującym przemieszczanie się ludzi jest gęstość tłumu, która jest z góry ograniczona przez rozmiary

ciał osób ewakuowanych. Krytyczną gęstością rozmieszczenia ludzi, w której nie ma żadnych odstępów pomiędzy poszczególnymi osobami, kształtuje się na poziomie ok. 5 os./m² [23].

Istotnym parametrem opisującym przemieszczanie się osób jest również przepływ strumienia ludzi na drodze ewakuacyjnej. Maksymalny przepływ może wynosić 1,225 os./m/s [24]. Ten parametr ma decydujące znaczenie podczas ewakuacji, w których mamy do czynienia ze zwężeniami drogi ewakuacyjnej (tzw. wąskie gardła) wymuszającymi na osobach ewakuowanych zatrzymanie się. Największy przepływ obserwuje się podczas ewakuacji tłumu o gęstości około 2 os./m² [23].

Modelowanie ewakuacji za pomocą automatu komórkowego

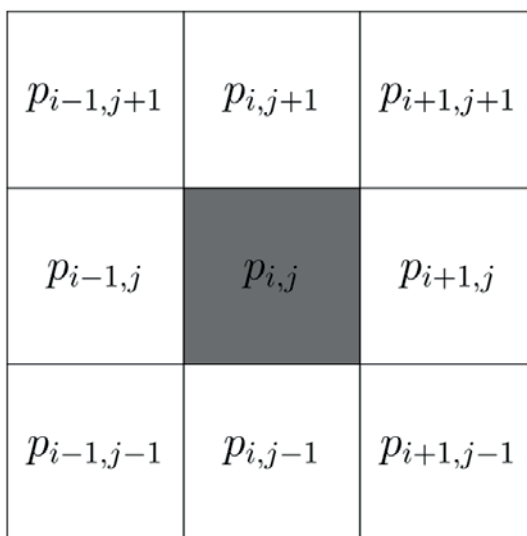
Założenia podstawowe

Model ewakuacji zbudowano na bazie automatu komórkowego. Zastosowano sąsiedztwo Moore'a. Komórka centralna ma w tym modelu ośmiu sąsiadów. Osoba zajmująca komórkę p_{ij} może wykonać przejście w pionie ($p_{i,j-1}$, $p_{i,j+1}$), poziomie ($p_{i-1,j}$, $p_{i+1,j}$) lub na skos ($p_{i-1,j-1}$, $p_{i-1,j+1}$, $p_{i+1,j-1}$, $p_{i+1,j+1}$). W pierwszej kolejności wyznaczane są komórki, do których możliwe jest przejście ewakuowanej osoby. Na podstawie równania 1 określone są wartości pola statycznego

RESEARCH AND DEVELOPMENT

możliwych do zajęcia komórek w sąsiedztwie komórki centralnej w zależności od tego, czy dana komórka jest zajęta przez inną osobę n_{ij} lub przeszkodę ξ_{ij} . Następnie na podstawie równania 2 spośród wszystkich komórek wybierane są tylko te, które mają największą wartość parametru m_{ij} . W modelu wprowadza się parametr μ , który odpowiada za tempo przemieszczania się osób. Przejście ewakuowanej osoby jest możliwe tylko do komórek o największej wartości. Odbywa się ono z założonym prawdopodobieństwem $\mu = 0,55$ dla opisywanego modelu. Dla komórek o wartościach parametru m_{ij} mniejszych od maksymalnej prawdopodobieństwo przejścia jest równe 0. Prawdopodobieństwo

przejścia zależy od wartości współczynnika μ oraz liczby komórek $|N|$ o największej wartości. Użyty w modelu automat jest asynchroniczny. Przy każdej iteracji tworzona jest losowa lista wszystkich osób, dla której kolejno wykonywany jest algorytm przejść. Kolejność przemieszczania się poszczególnych osób w danym kroku czasowym zależy od wylosowanej listy. Powoduje to, że w każdym kolejnym kroku czasowym kolejność przemieszczania się osób jest różna. Pozycja danej osoby jednoznacznie identyfikowana jest z konkretnym wyjściem ewakuacyjnym. Możliwość wpływu dodatkowych zmiennych na wybór wyjścia ewakuacyjnego podczas przemieszczania się osób nie był rozpatrywany.



Rycina 2. Sąsiedztwo Moore'a

Figure 2. The Moore neighborhood

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [25].

Source: Own elaboration based on [25].

$$m_{ij} = S_{ij} \cdot n_{ij} \cdot \xi_{ij} \quad (1)$$

gdzie:

m_{ij} – wartości pola statycznego możliwych do zajęcia komórek sąsiadujących,

S_{ij} – wartość pola statycznego,

$n_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{komórka zajęta przez inną osobę,} \\ 1 & \text{komórka niezajęta,} \end{cases}$

$\xi_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{komórka zajęta przez przeszkodę,} \\ 1 & \text{komórka niezajęta,} \end{cases}$

$$p_{ij} = \begin{cases} \mu \cdot \frac{1}{|N|}; N = \{m_{max} : m_{max} \geq m_{ij}\} \\ 0; m_{ij} < m_{max} \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

p_{ij} – prawdopodobieństwo przejścia do komórki sąsiedniej,

μ – prawdopodobieństwo dokonania wyboru,

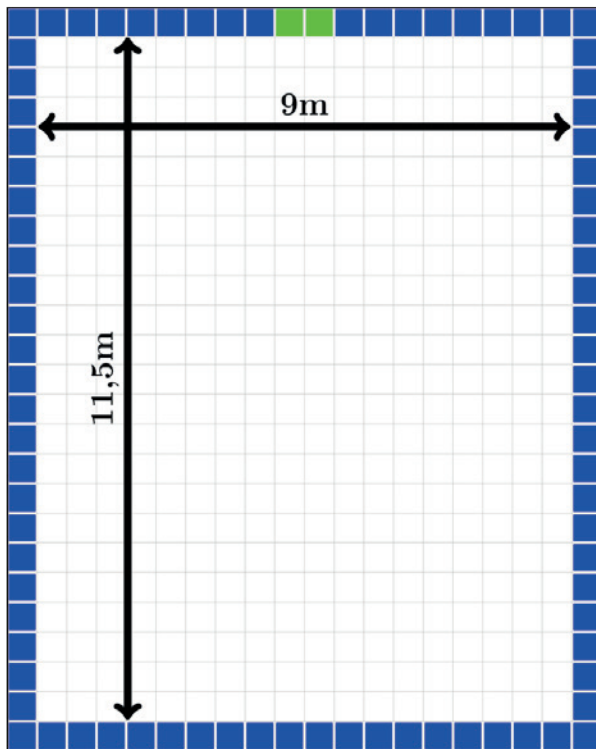
N – zbiór wszystkich największych wartości m_{ij} ,

$|N|$ – moc zbioru.

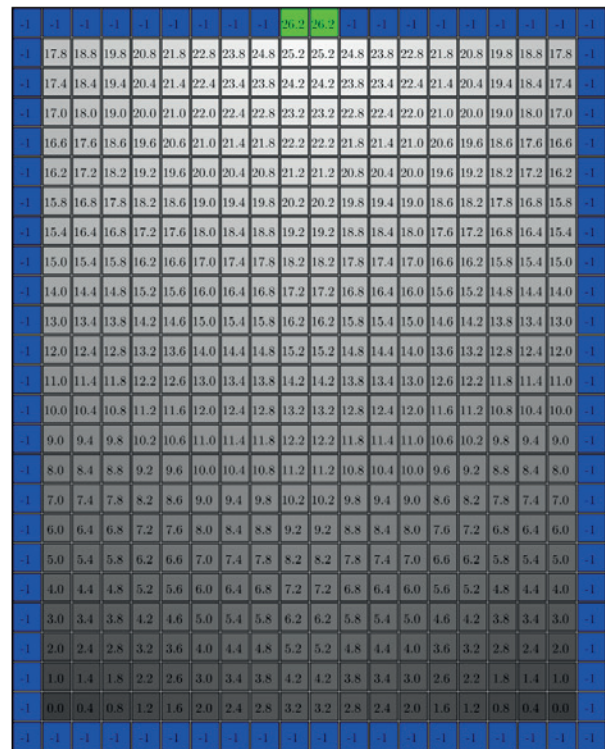
W badaniach przyjęto pomieszczenie o wymiarach 11,5 x 9 m podzielone siatką o wymiarach 0,5 x 0,5 m. Dla powierzchni pomieszczenia zastosowano jedną warstwę – statyczną. Warstwa

ta odwzorowuje odległość poszczególnych komórek od wyjścia ewakuacyjnego (wyjść ewakuacyjnych). Wartość pola statycznej jest obliczana zgodnie z metryką euklidesową. Dla przejść pionowych i poziomych względem wyjść ewakuacyjnych wartość pola wzrasta o 1, natomiast dla przejść po skosie – rośnie o $\sqrt{2}$. Następnie obliczana jest różnica między wartością maksymalną warstwy *Floor Field* a wartością danego pola. Graficzną prezentację pola statycznego rozważanych pomieszczeń przedstawiają ryciny 3b i 3d. Pola najjaśniejsze odpowiadają najbliższej odległości od wyjścia ewakuacyjnego, tym samym mają one największą wartość.

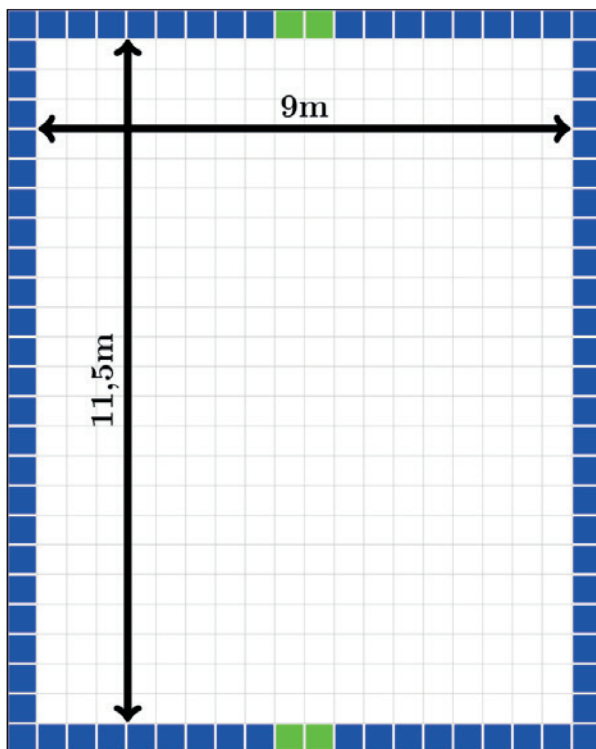
W proponowanym modelu krok czasowy odpowiadający jednej iteracji (funkcji przejścia) wynosi 1 s. Przyjęto, że dla każdej iteracji losowana jest kolejność, w jakiej poszczególne osoby odwzorowane na płaszczyźnie automatu będą dokonywały wyboru przejścia. Implementację modelu wykonano w języku skryptowym *Python*, korzystając z biblioteki do obliczeń naukowych *Numpy* i biblioteki matematycznej *Math* [26]. Język *Python* jest wieloplatformowym narzędziem programistycznym, co jest jego zaletą. Aplikacje napisane w tym języku skutecznie udaje się uruchomić na komputerach mających odmienną architekturę i na różnych systemach operacyjnych.



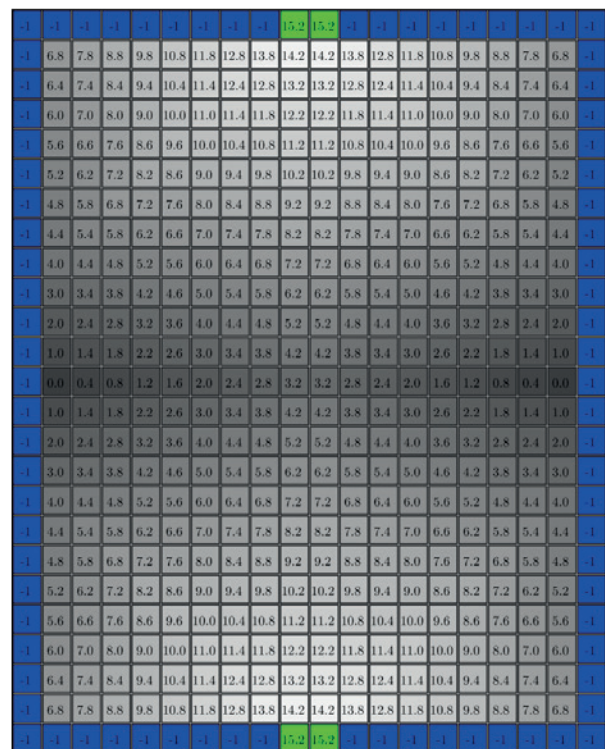
A



b



C



d

Rycina 3. Układ pomieszczenia dla scenariusza z jednym wyjściem ewakuacyjnym (a) i z dwoma wyjściami ewakuacyjnymi (c). Odzworowanie wartości pola statycznego za pomocą odcieni szarości dla scenariusza z jednym wyjściem ewakuacyjnym (b) i z dwoma wyjściami ewakuacyjnymi (d)

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

W implementacji modelu zdefiniowano funkcje:

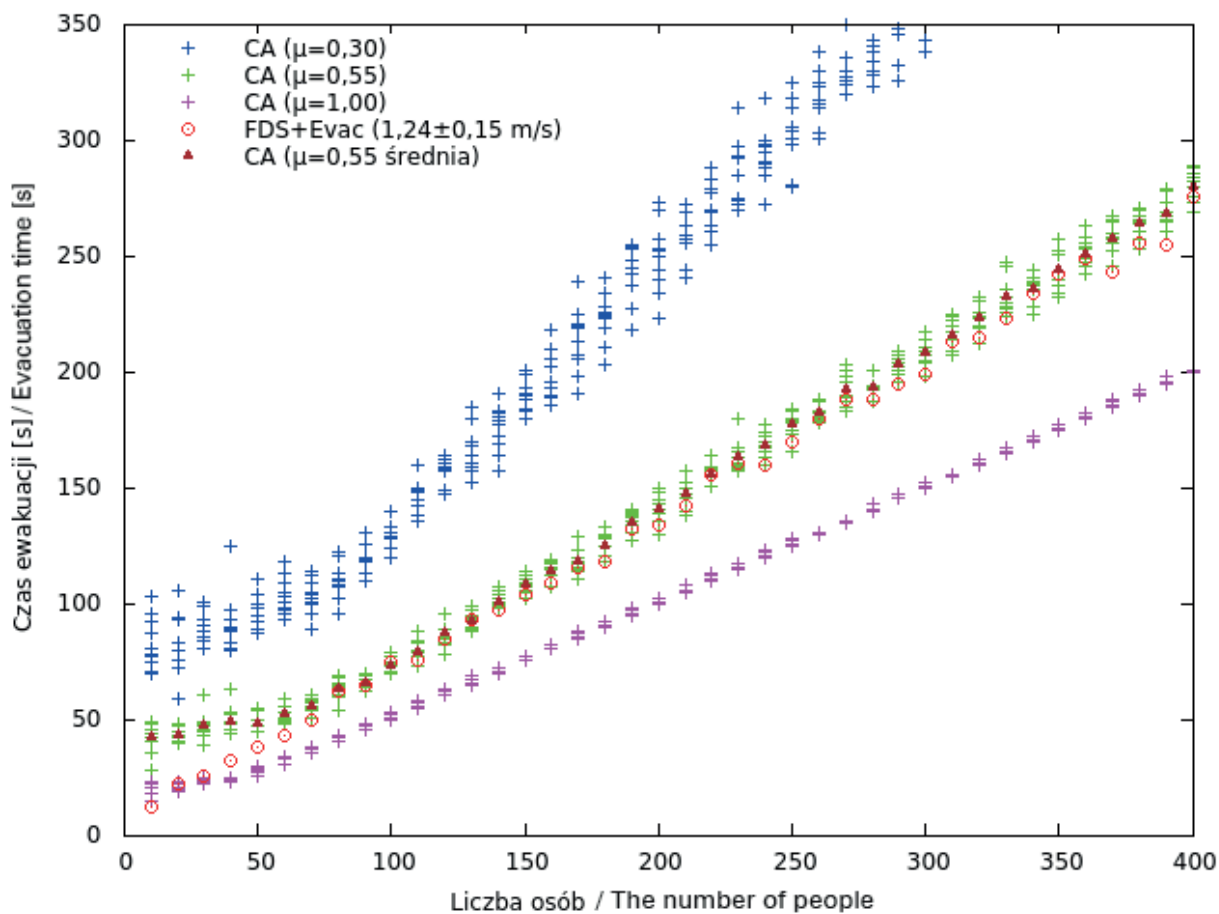
- kalkulacji wartości warstwy statycznej,
- kalkulacji przejść,
- uwzględniania przeszkód i innych uczestników ewakuacji.

Do kalkulacji przejść zastosowano algorytm zachłanny. Algorytm ten w celu wyznaczenia przejścia w każdym kroku dokonuje najlepiej rokującego w danym momencie wyboru rozwiązania częściowego [27]. Aby wyznaczyć komórkę, do której nastąpi przejście, oblicza się wartość m_{ij} , która jest iloczynem wartości komórki pola statycznego S_{ij} , wartości uzależnionej od stanu zajętości przez inną osobę n_{ij} oraz stanu zajętości przez przeszkodę ξ_{ij} . Prawdopodobieństwo przejścia p_{ij} jest zależne od założonego jako parametr podstawowy prawdopodobieństwa dokonania wyboru μ oraz liczby komórek o największej wartości m_{ij} dla komórki podstawowej i sąsiadujących. Jeśli wartość największa występuje dla komórki podstawowej, to osoba pozostaje w zajmowanej komórce w danym kroku czasowym. Uznaje się, że po osiągnięciu wyjścia ewakuacyjnego osoba opuściła pomieszczenie, w związku z czym jest usuwana z powierzchni przeznaczonych do ewakuacji, a wyjście ewakuacyjne jest zwalniane dla kolejnych osób.

Symulacje ewakuacji przeprowadzono przy zastosowaniu proponowanego modelu oraz programu FDS 6.3.0+Evac 2.5.1. Obliczenia wykonano na komputerze klasy PC z procesorem Intel Core i3-2348M (2,3 GHz) i 4 GB pamięci RAM. Program FDS+Evac oraz automat komórkowy podczas oszacowywania czasu ewakuacji korzystał z 1 rdzenia procesora.

Porównanie wyników oszacowania czasu ewakuacji

W celu weryfikacji zaproponowanego modelu wykonano symulacje ewakuacji osób z pomieszczenia z jednym wyjściem ewakuacyjnym oraz z dwoma wyjściami zlokalizowanymi naprzeciw siebie (ryc. 3). Otrzymane wyniki porównano z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu programu FDS+Evac dla takich samych układów pomieszczeń. Modelowanie wykonano dla różnej liczby osób (10–400) w pomieszczeniu. Czasy ewakuacji otrzymane przy zastosowaniu zaproponowanego modelu są zbieżne z czasami ewakuacji uzyskanymi za pomocą programu FDS+Evac. Najdokładniejsze dopasowanie wyników występuje dla współczynnika $\mu = 0,55$. Porównanie czasów ewakuacji z poszczególnych pomieszczeń przedstawiają ryciny 4 i 5.

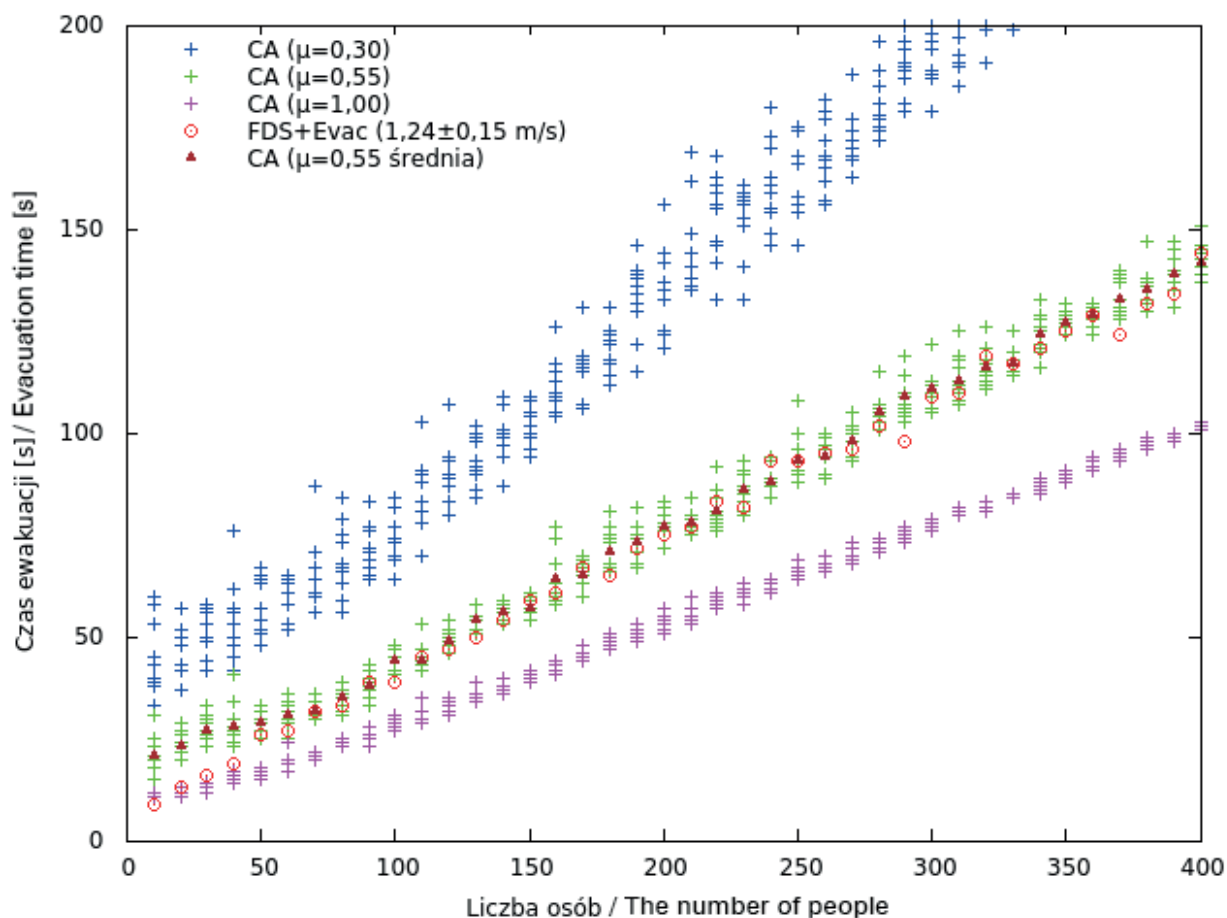


Rycina 4. Porównanie czasów ewakuacji z pomieszczenia z jednym wyjściem (FDS+Evac, CA)

Figure 4. Evacuation time through one exit (FDS+Evac, CA)

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Rycina 5. Porównanie czasów ewakuacji z pomieszczenia z dwoma wyjściami (FDS+Evac, CA)

Figure 5. A comparison of evacuation time through two exits (FDS+Evac, CA)

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

W procesie weryfikacji modeli powszechnie stosuje się testy opracowane przez IMO [28]. W dokumentacjach weryfikacji na testy te powołują się producenci wielu programów do symulacji ewakuacji [29, 30]. Test IMO 9 wykorzystuje się do wyznaczania czasu ewakuacji dużej liczby osób (1000 osób) z jednego pomieszczenia przy występowaniu dwóch i czterech

wyjść ewakuacyjnych. Wymiary pomieszczenia oraz założenia szczegółowo opisane są w [13]. Dla proponowanego modelu wykonano właśnie test IMO 9. Otrzymane wyniki są porównywalne z czasami ewakuacji obliczonymi przy użyciu komercyjnych programów modelujących ewakuację (Pathfinder, TraffGo i FDS+Evac).

Tabela 1. Zestawienie czasów ewakuacji dla testu IMO 9

Table 1. A comparison of the evacuation time for the IMO 9 test

| Nazwa modelu/Model name | Dwa wyjścia ewakuacyjne/ Two evacuation exits | Cztery wyjścia ewakuacyjne/ Four evacuation exits |
|--|--|--|
| Automat komórkowy/Cellular automaton | 380 s | 210 s |
| Pathfinder Steering [29] | 318 s | 166 s |
| Pathfinder SFPE [29] | 385 s | 196 s |
| SFPE [29] | 380 s | 190 s |
| TraffGo v.2.4.3.1 [30] | 440 s | 236 s |
| TraffGo v.2.5.0.7 [30] | 330 s | 179 s |
| FDS 6.3.0 + Evac 2.5.1 (obliczono przy użyciu plików wejściowych dostępnych na stronie internetowej twórcy oprogramowania) | 420 s | 217 s |

Źródło: Opracowanie własne [29, 30].

Source: Own elaboration [29, 30].

Porównanie złożoności obliczeniowej modelu ewakuacji wykorzystującego automat komórkowy ze złożonością obliczeniową modelu ewakuacji Social Force zaimplementowanego w programie FDS+Evac

Złożoność obliczeniowa to ilość zasobów komputerowych koniecznych do wykonania programu realizującego algorytm. Wyróżniamy złożoność pamięciową oraz czasową. Złożoność jest opisywana w trzech notacjach: Θ , O i Ω . Notacja Θ jest funkcją opisującą dokładne odwzorowanie czasu działania algorytmu w zależności od ilości danych wejściowych. Notacja O określa górną granicę, a notacja Ω dolną granicę czasu działania algorytmu w zależności od ilości danych wejściowych. Istotną cechą automatów komórkowych jest ich mała złożoność obliczeniowa wynosząca $O(n)$ [27]. W związku z tym możliwe jest modelowanie ewakuacji dużych grup ludzi przy wykorzystaniu stosunkowo małej mocy obliczeniowej, a otrzymane czasy ewakuacji są wtedy porównywalne z czasami uzyskanymi przy zastosowaniu innych – bardziej złożonych modeli. Takim przykładem jest model *Social Force* zaimplementowany w programie *FDS+Evac*, którego złożoność obliczeniowa wynosi $O(n^2)$. Porównanie czasu potrzebnego na modelowanie 1 s procesu ewakuacji dla poszczególnej liczby osób przedstawia rycina 6. Zużycie czasu procesora w przypadku wykorzystania modelu *Social Force* zaimplementowanego w programie *FDS+Evac* rośnie wykładniczo w stosunku do liczby osób. Na podstawie otrzymanych wyników obliczono parametry równania kwadratowego

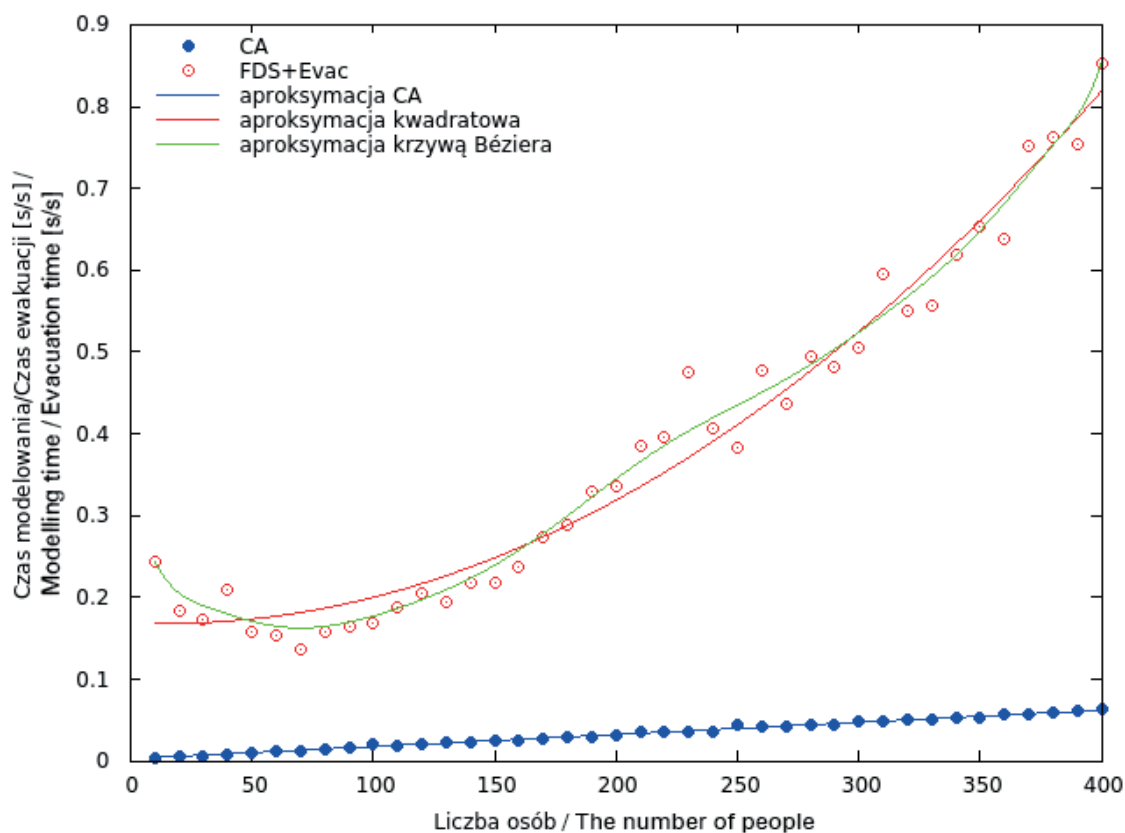
(równanie 3) dla programu *FDS+Evac* i parametry równania liniowego (równanie 4) dla modelu opartego na automacie komórkowym. Czas procesora przypadający na wymodelowanie 1 s procesu ewakuacji w zależności od ilości danych wejściowych jest funkcją wykładniczą i ma postać:

$$f(n) = 4,381 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 - 1,285 \cdot 10^{-4} \cdot n + 0,170 \quad (3)$$

Natomiast czas niezbędny do wymodelowania 1 s procesu ewakuacji zależy liniowo od liczby ewakuowanych osób w przypadku proponowanego modelu opartego na automacie komórkowym:

$$f(n) = 1,479 \cdot 10^{-4} \cdot n + 3,000 \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

Modelowanie ewakuacji 400 osób z pomieszczenia z dwoma wyjściami przy zastosowaniu *FDS+Evac* zajmuje ponad 122 s, natomiast przy zastosowaniu automatu komórkowego – niepełna 10 s. Jeśli porównamy te czasy z czasami ewakuacji, to okaże się, że na 1 s czasu ewakuacji model *Social Force* potrzebuje prawie 1 s czasu procesora, podczas gdy automat komórkowy potrzebuje go tylko 0,06 s. Ponadto czas ten zwiększa się wraz ze wzrostem liczby osób. Dla testu IMO 9 (1000 osób) przy czterech wyjściach ewakuacyjnych czas obliczeń za pomocą programu *FDS+Evac* wynosi 1160 s (ok. 20 minut), a za pomocą automatu komórkowego – 60 s.



Rycina 6. Wykorzystanie czasu procesora na 1 s oszacowanego czasu ewakuacji dla poszczególnej liczby osób

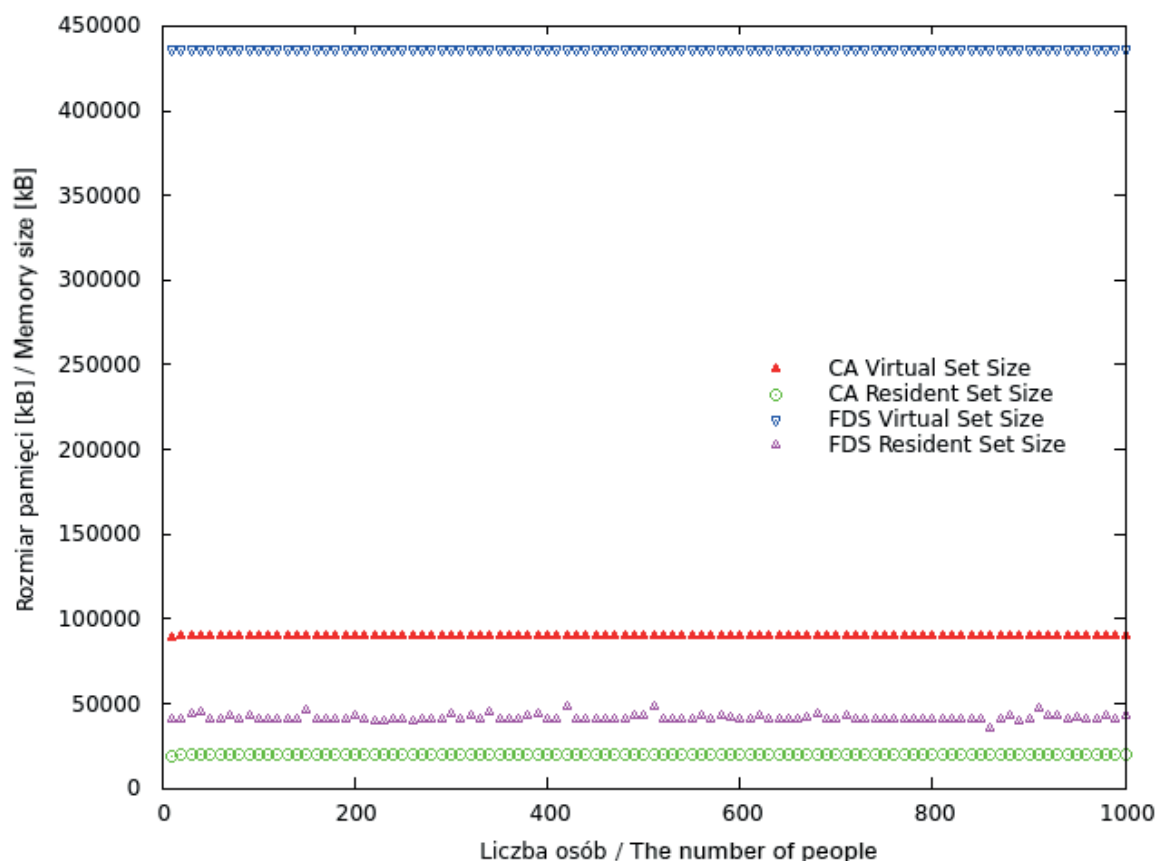
Figure 6. The use of processor time for 1 sec. of estimated evacuation time for a specified number of people

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Podczas obliczeń komputerowych istotnym parametrem jest użycie pamięci operacyjnej. Podczas szacowania czasu ewakuacji w teście IMO 9 dla czterech wyjść ewakuacyjnych Program *FDS+Evac* alokuje około 450 MB pamięci wirtualnej,

natomiast automat komórkowy – jedynie 90 MB. Pamięć fizycznie zajęta przez procesy obliczeniowe to odpowiednio około 48 MB i 20 MB. Alokację pamięci w czasie przedstawia rycina 7.



Rycina 7. Alokacja pamięci operacyjnej przez procesy modelowania ewakuacji *FDS+Evac* i *CA* dla testu IMO 9 z czterema wyjściami ewakuacyjnymi dla poszczególnej liczby osób

Figure 7. The allocation of operating memory by the *FDS+Evac* and *CA* evacuation modelling processes for the IMO 9 test with four evacuation exits for a specified number of people

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Wielkości te mają znaczenie przy modelowaniu ewakuacji większych grup ludzi, wtedy bowiem dostępne zasoby sprzętowe (pamięć operacyjna, moc obliczeniowa) mają wpływ na wykonanie obliczeń.

Podsumowanie

Zaletą modeli korzystających z automatów komórkowych jest ich prosta budowa i implementacja. Mała złożoność obliczeniowa pozwala na znaczne skrócenie obliczeń oraz na modelowanie ewakuacji dużych grup ludzi. Dzięki prezentowanemu modelowi możliwe jest modelowanie ewakuacji 30 000 osób z pomieszczenia o wymiarach 150 x 105 m przy zastosowaniu komputera klasy PC.

Automaty komórkowe wykorzystywane w modelowaniu wszelkiego rodzaju procesów fizycznych, w tym ewakuacji, mogą mieć w przyszłość duże zastosowanie. Automaty niehomogeniczne, w przeciwieństwie do homogenicznych, są jeszcze słabo zbadane. Prawdopodobnie właśnie dlatego jest wiele możliwości opracowywania nowych modeli ewakuacji bazujących na niehomogenicznych automatach komórkowych, które jeszcze lepiej będą odwzorowywać rzeczywiste zachowania tłumu i interakcje między jego uczestnikami. Implementacja modelu w narzędziach CAD pozwoliłaby na weryfikację ewakuacji jeszcze na etapie projektowania budynku. Działanie algorytmu szacującego czas ewakuacji w projektowanym budynku nie obciążałoby komputera projektanta. Informacja o oszacowanym czasie ewakuacji jest istotna dla prawidłowego zaprojektowania oraz wykonania budynków i obiektów przeznaczonych do użytkowania.

Literatura

- [1] Ustawa z dnia 20 marca 2009 r. o bezpieczeństwie imprez masowych (Dz.U. z 2009 r. nr 62, poz. 504 z późn. zm.).
- [2] LeDoux J., *The emotional brain: The mysterious underpinnings of emotional life*, Simon and Schuster, New York 1998.
- [3] Piwiński J., *Modelowanie zbiorowych zachowań ludzkich jako narzędzie wspomagające zarządzanie kryzysowe*, „Pomiary Automatyka Robotyka” 2010, nr 2, 209–216, <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BSW1-0076-0013/c/Piwiński.pdf> [dostęp: 8.03.2017].
- [4] Burstedde C., Klauck K., Schadschneider A., Zittartz J., *Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automata*, „Physica A: Statistical Mechanics and its Applications” 2001, 295(3), 507–525, <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/0102397.pdf> [accessed: 8.03.2017].
- [5] Helbing D., Molnar P., *Social force model for pedestrian dynamics*, „Physical Review E” 1995, 51, 4282–4286, <http://vision.cse.psu.edu/courses/Tracking/vlpr12/HelbingSocialForceModel95.pdf> [accessed: 8.03.2017].
- [6] Okazaki S., Matsushita S., *A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing*, [w:] *Engineering for Crowd Safety*, Smith R., Dickie J. (eds.), 1993, 271–280, <http://www.anc-d.u-fukui.ac.jp/~sat/ECS93.pdf> [accessed: 8.03.2017].
- [7] Shi J., Ren A., Chen C., *Agent-based evacuation model of large public buildings under fire conditions*, „Automation in Construction” 2009, 18(3), 338–347, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580508001544> [accessed: 8.03.2017].
- [8] Wąs J., *Algorytmy modelowania inteligentnych zachowań w zagadnieniach dynamiki pieszych z zastosowaniem niehomogenicznych automatów komórkowych*, rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2006, <http://winntbg.bg.agh.edu.pl/rozprawy/9768/full9768.pdf> [dostęp: 8.03.2017].
- [9] Barański M., Maciak T., *Automaty komórkowe w modelowaniu ewakuacji*, BiTP Vol. 43 Issue 3, pp. 127–142, http://bitp.cnbop.pl/wp-content/uploads/2016/01/BiTP_Vol_43_Issue_3_2016pp.127-141.pdf [dostęp: 8.03.2016].
- [10] Mrowiński M., Gradowski T., Kosiński R., *Models of pedestrian evacuation based on cellular automata*, „Acta Physica Polonica A” 2012, 121(2B), B95-B100, <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/121/a121z2bp19.pdf> [accessed: 8.03.2017].
- [11] Parisi, D. R., Dorso C. O., *Microscopic dynamics of pedestrian evacuation*, „Physica A: Statistical Mechanics and its Applications” 2005, 354, 606–618.
- [12] Feliciani C., Nishinari K., *An improved Cellular Automata model to simulate the behavior of high density crowd and validation by experimental data*, „Physica A: Statistical Mechanics and its Applications” 2016, 451, 135–148.
- [13] Interim guidelines for evacuation analyses for new and existing passenger ship, *International Maritime Organization 2002*, MSC/Circ.1033, <http://www.sjofartsverket.se/upload/7156/1033.pdf> [accessed: 8.03.2017].
- [14] British Standard PD 7974-6:2004 The application of firesafety engineering principles to firesafety design of buildings – Human factors: Life safetystrategies – Occupantevacuation, behavior and condition (Sub-system 6), British Standard Institute 2004.
- [15] Procedury organizacyjno-techniczne w sprawie spełnienia wymagań w zakresie bezpieczeństwa pożarowego w inny sposób niż to określono w przepisach techniczno-budowlanych, w przypadkach wskazanych w tych przepisach, oraz stosowania rozwiązań zamiennych, zapewniających niepogorszenie warunków ochrony przeciwpożarowej, w przypadkach wskazanych w przepisach przeciwpożarowych, Biuro Rozpoznawania Zagrożeń Komendy Głównej Państwowej Straży Pożarnej, Warszawa 2008, <http://www.straz.gov.pl/download/1795> [dostęp: 8.03.2017].
- [16] Barański M., Maciak T., *Określanie czasu procesu bezpiecznej ewakuacji ludności z zagrożonych obiektów*, „Zeszyty Naukowe SGSP” 2014, 49(1), 78–97, <https://www.sgsp.edu.pl/files/upload/awojcik/ZN-1-2014-Internet.pdf> [dostęp: 8.03.2017].
- [17] Cłapa I., *Instrukcja bezpieczeństwa pożarowego, scenariusz pożarowy oraz próbna ewakuacja jako kluczowe elementy zarządzania systemem bezpieczeństwa pożarowego budynku*, BiTP Vol. 40 Issue 4, 2015, pp. 123–131, http://czytelnia.cnbop.pl/sites/default/files/czytelnia/files/pdf/BiTP_Vol_40_Issue_4,2015,123-131.pdf [dostęp: 8.03.2017].
- [18] Cłapa I., Dziubiński M., *Zachowanie ludzi jako jeden z czynników determinujących przebieg procesu ewakuacji*, BiTP Vol. 35 Issue 3, 2014, pp. 149–158, http://bitp.cnbop.pl/wp-content/uploads/2016/02/BiTP_Vol.35_Issue_32014pp.149-158.pdf [dostęp: 8.03.2017].
- [19] Korhonen T., Hostikka S., Heliovaara S., Ehtamo H., *FDS+Evac: An Agent Based Fire Evacuation Model*, [in:] *Pedestrian And Evacuation Dynamics 2008*, W. Kilngsch, Ch. Rogsch, A. Schadschneider, M. Schreckenberg (eds.), Springer, Berlin Heidelberg 2010, 109–120, http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/fdsevac/documents/PED_Korhonen_VTT_Preprint.pdf [accessed: 8.03.2017].
- [20] Shen Y., Wang Q., Yan W., Sun J., Zhu K., *Evacuation processes of different genders in different visibility conditions—an experimental study*, „Procedia Engineering” 2014, 71, 65–74.
- [21] Henderson L., *The statistics of crowd fluids*, „Nature” 1971, 229, 381–383.
- [22] Seyfried, A., Steffen B., Klingsch W., Lippert T., Boltes M., *Steps toward the fundamental diagram—empirical results and modelling*, [in:] *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*, N. Waldau, P. Gattermann, H. Knoflacher, M. Schreckenberg (eds.), Springer, Berlin Heidelberg 2007, 377–390.
- [23] Proulx G., *Evacuation time*, [in:] *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 2008*, P. DiNenno, D. Drysdale, C. Beyler (eds.), Quincy 2008, 3–355, 3–372.
- [24] Helbing D., Mukerji P., *Crowddisasters as systemicfailures: analisis of the love paradedisaster*, https://www.sg.ethz.ch/ethz_risk-center_wps/pdf/ETH-RC-12-010.pdf [accessed: 8.03.2017].
- [25] Nitzsche C., *Cellular automata modeling for pedestrian dynamics*, https://physik.uni-greifswald.de/fileadmin/uni-greifswald/fakultaet/mnf/physik/ag_schneider/Arbeiten/bachelorneu.pdf [accessed: 8.03.2017].
- [26] Oficjalna strona internetowa języka programowania Python, <http://www.python.org> [dostęp: 8.03.2017].
- [27] Cormen T., Leiserson C., Rivest R., Stein C., *Wprowadzenie do algorytmów*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
- [28] Oficjalna strona internetowa International Maritime Organization, <http://www.imo.org> [dostęp: 8.03.2017].
- [29] IMO Test 9: Room with four exits, Pathfinder 2011, http://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/downloads/2011/07/imo_test_09.pdf [accessed: 8.03.2017].
- [30] IMO Analysis Report, TraffGo HT 2009, <http://www.traffgo-h.com/downloads/pedestrians/downloads/IMO%20Testbericht%20PedGo%20EN.pdf> [accessed: 8.03.2017].

KPT. MGR INŻ. MARIUSZ BARAŃSKI – starszy specjalista w wydziale ds. operacyjnych i kontrolno-rozpoznawczych w Komendzie Powiatowej Państwowej Straży Pożarnej w Oławie, absolwent Szkoły Głównej Służby Pożarniczej oraz Politechniki Wrocławskiej. Programista i autor publikacji z zakresu modelowania ewakuacji.

DR HAB. INŻ. TADEUSZ MACIAK – profesor Politechniki Białostockiej, zatrudniony w Katedrze Mediów Cyfrowych i Grafiki Komputerowej Wydziału Informatyki Politechniki Białostockiej, emerytowany profesor Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie, były kierownik Zakładu Informatyki i Łączności w SGSP. Autor wielu publikacji związanych z problematyką szeroko pojętej obronności wewnętrznej kraju.