

**PROJEKT: KWERENDA LITERTUROWA DO
CROWDSIMULATOR KWERENDA LITERTUROWA DO
CROWDSIMULATOR**

**KOD KURSU: 120-ISI-1S-777
PRZEDMIOT: SYMULACJA SYSTEMÓW DYSKRETNYCH
(SSD)**

Autorzy projektu

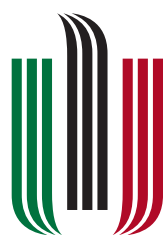
GABRIELA CZAPSKA

BARTŁOMIEJ JUCHA

MIŁOSZ KLUCZEK

Opiekun projektu

Dr inż. MARCIN PIEKARCZYK



AGH

EAIiB / Katedra Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w
Krakowie
Kraków, Polska

5 semestr roku akademickiego 2024/2025

Spis treści

Abstract	iii
1 Wprowadzenie	1
1.1 Cele Projektu	1
1.2 Oczekiwane rezultaty	2
2 Przegląd wybranych publikacji	3
2.1 Simulation of running crowddynamics: potential-based cellular automa- tamodel	3
2.2 Cellular Automata as the basis of effective and realistic agent-based models of crowd behavior	4
2.3 Social Force Model for Pedestrian Dynamics	5
2.4 Crowd simulation: applying mobile grids to the social force model . . .	5
2.5 An integration of enhanced social force and crowd control models for high-density crowd simulation	6
2.6 Social Distances Model of Pedestrian Dynamics	7
3 PODSUMOWANIE	9
Bibliografia	10

Abstract

Zachowanie tłumu jest złożonym zjawiskiem, które odgrywa kluczową rolę w wielu kontekstach, takich jak imprezy masowe, ewakuacje, transport publiczny oraz planowanie urbanistyczne. Skuteczne zarządzanie tłumem wymaga dogłębnego zrozumienia mechanizmów jego zachowania oraz umiejętności przewidywania reakcji ludzi na różne bodźce. Tradycyjne podejścia, bazujące na statycznych modelach, często nie są wystarczająco precyzyjne, aby odzwierciedlić dynamiczne interakcje zachodzące w tłumie, takie jak przepływ osób, reakcje na zagrożenia czy zachowanie w ograniczonej przestrzeni.

Wraz z rozwojem technologii pojawia się konieczność doskonalenia narzędzi do modelowania i symulacji zachowań tłumu, czego ostatecznym celem jest poprawa bezpieczeństwa i efektywności zarządzania dużymi zbiorowiskami ludzi. Stosowanie zaawansowanych paradygmatów, takich jak Social Force, Automaty Komórkowe czy Social Distances Model, umożliwia bardziej realistyczne odwzorowanie interakcji międzyludzkich oraz reakcji na zmieniające się warunki, symulując zachowanie ludzkie. Doskonalenie tej dziedziny może przyczynić się do tworzenia lepszych strategii ewakuacyjnych, poprawy projektowania przestrzeni publicznej oraz zwiększenia bezpieczeństwa w sytuacjach kryzysowych tj. zamachy czy wybuchy paniki, co podkreśla znaczenie dalszych badań nad dynamiką tłumu i rozwojem technologii symulacyjnych.

1. Wprowadzenie

1.1 Cele Projektu

Głównym celem tego projektu są stworzenie platformy do symulacji zachowań tłumu, która umożliwi ich analizę poprzez wykorzystanie paradygmatów modelowania Social Force, Automatów Komórkowych oraz Social Distances Model oraz rozwój narzędzi wspomagających badania nad dynamiką tłumu oraz ich zastosowanie w praktyce, takich jak zarządzanie bezpieczeństwem podczas wydarzeń masowych, projektowanie infrastruktury publicznej czy ewakuacja. Poniższe cele szczegółowe stanowiły zestaw kroków, dzięki którym uda się nam usystematyzować pracę i jakie należy podjąć, aby doprowadzić do realizacji celów głównych :

- **Implementacja modelu opartego na:** Social Force, Automaty Komórkowe oraz Social Distances Model.
- **Kalibracja modelu** w celu optymalizacji parametrów, aby jak najwierniej odwzorować rzeczywiste zachowania tłumu.
- **Walidacja modelu** poprzez porównanie wyników symulacji z danymi rzeczywistymi, co pozwoli ocenić dokładność symulacji z rzeczywistymi scenariuszami.
- **Analiza wyników symulacji** poprzez generowanie statystyk
- **Ocena przydatności stworzonego modelu** w kontekście praktycznych zastosowań.
- **Opracowanie poniższego raportu** z wynikami naszych badań, rozważeniami na temat efektywności modelu co do rzeczywistych scenariuszy i rekomendacje co do potencjalnych dalszych prac badawczych lub rozwoju platformy.

1.2 Oczekiwane rezultaty

Oczekiwanym rezultatem jest stworzenie narzędzia - platformy wspomagającej badania nad dynamiką tłumu, wpływającej istotnie na kwestię bezpieczeństwa podczas wydarzeń masowych, projektowanie infrastruktury publicznej czy tworzenia ścieżek ewakuacji.

Jako produkty pośrednie, w trakcie procesu tworzenia platformy powstanie:

- **Skalibrowanych model:** skalibrowany model symulacyjny oparty na paradygmatach Social Force, Automaty Komórkowe, Social Distances Model, który będzie dostosowany do różnych scenariuszy związanych z zachowaniami tłumu.
- **Zestaw wytycznych i sugestii dotyczących kalibracji modelu,** uwzględniających parametry, takie jak gęstość tłumu, szybkość poruszania się jednostek, dystanse społeczne czy siły oddziaływań między ludźmi.
- **Wyniki walidacji,** w których porównano symulacje z rzeczywistymi danymi zebranymi podczas wydarzeń masowych
- **Zestaw statystyk** opisujących zachowanie tłumu w różnych scenariuszach, takich jak średni czas ewakuacji, liczba potencjalnych kolizji, czas potrzebny na osiągnięcie strefy bezpiecznej i inne.
- **Wnioski dotyczące efektywności modelu,** bazujące na wynikach symulacji oraz porównanie skuteczności zastosowania go w praktyce.
- **Poniższa dokumentacja techniczna i raport z badań** oraz rekomendacje dla przyszłych prac badawczych lub rozwoju oprogramowania.

2. Przegląd wybranych publikacji

2.1 Simulation of running crowddynamics: potential-based cellular automata model

W pracy [1] autorzy Tao Yu, Hai-Dong Yang analizują ewakuację pieszych w sytuacjach awaryjnych, stosując rozszerzony model automatu komórkowego. Badanie koncentruje się na symulacji ewakuacji grup mieszanych pieszych, którzy poruszają się z różnymi prędkościami (chodząc i biegnąc), w przestrzeniach z wieloma wyjściami. Kluczowe innowacje wprowadzone w tym modelu to zastosowanie dynamicznego algorytmu pola potencjalnego, który uwzględnia propagację paniki, konwersję pieszych z chodzących na biegnących oraz różne konfiguracje przeszkód.

Autorzy wykorzystali metodę najbliższych sąsiadów (k-nearest neighbors) w celu identyfikacji pieszych zmieniających się z chodzących na biegnących w wyniku paniki. Przeprowadzono symulacje numeryczne, analizując wpływ początkowej gęstości pieszych oraz układu przeszkód na wydajność ewakuacji. Wyniki wskazują, że odpowiednia proporcja biegnących pieszych może zwiększyć efektywność ewakuacji, natomiast panika może być zaraźliwa, co powoduje, że piesi zaczynają biec, przyspieszając proces ewakuacji lub opóźniając go, zależnie od przestrzeni ewakuowanej.

Główne metody: Rozszerzony model automatu komórkowego, dynamiczne pole potencjalne, zamiana pieszych z chodzących na biegnących w oparciu o metodę k-nearest neighbors.

Wyniki: Badania wykazały, że odpowiednia liczba biegnących pieszych poprawia efektywność ewakuacji, natomiast przeszkody mogą zarówno negatywnie wpływać na prędkość ewakuacji, jak i opóźniać zatłoczenie w pobliżu wyjść, co może zwiększać bezpieczeństwo ewakuowanych.

Referencja: Tao Yu, Hai-Dong Yang, „Simulation of running crowddynamics: potential-based cellular automata model”, IEEE Access, 2020

2.2 Cellular Automata as the basis of effective and realistic agent-based models of crowd behavior

W pracy [2] autorzy Robert Lubaś, prof. Jarosław Wąs, Jakub Porzycki omawiają zastosowanie automatów komórkowych (CA) jako podstawy realistycznych modeli agentowych do symulacji zachowań tłumu. Klasyczna forma CA, jednorodna i synchroniczna, ma ograniczenia w praktycznych zastosowaniach. Tym samym, zaproponowano wykorzystanie niejednorodnych, asynchronicznych CA w połączeniu z modelowaniem agentowym, aby lepiej symulować złożone systemy, zwłaszcza dynamikę tłumu. W przeciwieństwie do większości symulacji CA, które koncentrują się na poziomie operacyjnym i taktycznym (np. omijanie przeszkód czy nawigacja w prostych scenariuszach), autorzy rozszerzyli model o poziom strategiczny. Pozwalało to na bardziej złożone scenariusze, takie jak reakcje na nieoczekiwane wydarzenia lub zmiany tras ruchu w czasie rzeczywistym. Autorzy użyli bardziej szczegółowej reprezentacji środowiska, tworząc siatkę kwadratową niejednorodnego CA - zamiast jednolitego podejścia do wszystkich komórek, komórki mają różne reguły przejść, co pozwala na bardziej złożoną dynamikę ruchu. Wprowadzono bardziej realistyczną eliptyczną reprezentację pieszych (bazując na modelu odległości społecznych). Środek elipsy odpowiada pozycji pieszego w komórce, a jego ruch wpływa na sąsiednie komórki zgodnie z możliwością ich "kompresji" przez tłum. Autorzy zaproponowali nową metodę rozwiązywania konfliktów między pieszymi. Zastosowano m.in. priorytetyzację na podstawie czasu oczekiwania i losowość, aby lepiej odwzorować rzeczywiste sytuacje. Autorzy podkreślają, że ich podejście sprawdza się zarówno w małych symulacjach, np. ewakuacji 31 osób z pokoju, jak i w symulacjach dużej skali, np. ewakuacji 70 tysięcy ludzi ze stadionu Allianz Arena, co świadczy o skalowalności projektu.

Główne metody: Agent-based modelling approach, Automaty Komórkowe, Reprezentacja pieszych zgodnie z social distance model, Data-driven simulation

Wyniki: W symulacji ewakuacji stadionu Allianz Arena dla 70 tysięcy ludzi, model był w stanie efektywnie odwzorować dynamikę tłumu na różnych poziomach obiektu. Udało się również zrealizować symulacje w mniejszych przestrzeniach, jak np. ewakuacja sali wykładowej. Dzięki eliptycznej reprezentacji pieszych, autorzy uzyskali bardziej realistyczne odwzorowanie gęstości tłumu. Jednym z ograniczeń modelu jest pewne zniekształcenie w odwzorowaniu środowiska oraz trajektorii ruchu pieszych. Ze względu na użycie siatki komórkowej, trasy pieszych mają tendencję do przybierania wielokątnego kształtu. Jednakże, model ma duży potencjał do zastosowania w syste-

mach działających w czasie rzeczywistym, np. w monitoringu tłumu podczas wydarzeń masowych.

Referencja: Cellular Automata as the basis of effective and realistic agent-based models of crowd behavior, Robert Lubaś, Jarosław Wąs, Jakub Porzycki, The Journal of Supercomputing 2016

2.3 Social Force Model for Pedestrian Dynamics

W [3], będącej szczegółowym opisem modelu sił społecznych, autor wyznacza nowe podejście do modelowania zachowań pieszych. Model ten zakłada, że ruch pieszych można opisać poprzez siły, które nie są bezpośrednio wywierane przez otoczenie, ale reprezentują wewnętrzne motywacje jednostek do podejmowania określonych działań. W modelu kluczowe są trzy rodzaje sił: przyspieszenie do pożądanej prędkości, utrzymanie dystansu od innych pieszych i granic oraz atrakcyjne efekty. Ruch pieszych jest opisany nieliniowymi równaniami Langevina, co pozwala na modelowanie interakcji między pieszymi w dynamiczny sposób.

Główne metody: Model Social Force

Wyniki: Symulacje komputerowe wykazały, że model sił społecznych realistycznie i trafnie opisuje samoorganizację tłumów, w tym tworzenie się pasów pieszych idących w jednym kierunku oraz oscylacyjne zmiany kierunku w wąskich przejściach. Model nie uwzględnia strategicznego myślenia pieszych, a jedynie ich automatyczne reakcje

Referencja: Social Force Model for Pedestrian Dynamics, Dirk Helbing, Peter Molnar May 1998, Physical review A, Atomic, molecular, and optical physics 51(5)

2.4 Crowd simulation: applying mobile grids to the social force model

Autorzy [4] omawiają udoskonalenia modelu sił społecznych (SF) do symulacji dynamiki pieszych, szczególnie w warunkach niskiej gęstości. Tradycyjny model SF może prowadzić do nierealistycznych trajektorii ruchu tłumu, przypominających cząsteczki, a nie zachowania ludzi, zwłaszcza w scenariuszach z przeszkodami. Proponowane modyfikacje obejmują wprowadzenie mobilnej siatki, która umożliwia pieszym dynamiczne dostosowywanie swoich prędkości w zależności od otoczenia. Efektem tego są płyn-

niejsze, bardziej spójne trajektorie, a także zachowanie kluczowych zjawisk, takich jak „szybsze-jest-wolniejsze” (w tłumie pieszych osoby, które próbują poruszać się szybciej, mogą w rzeczywistości napotykać na większe opóźnienia lub blokady) oraz efekty łukowe związane z dynamiką tłumu. Dodatkowo model uwzględnia „efekt krawędzi” obserwowany w wąskich korytarzach. Zrozumienie tych dynamik jest kluczowe dla planowania bezpiecznych i efektywnych przestrzeni publicznych, szczególnie w czasie ewakuacji.

Główne metody: Social force model · Mobile grid

Wyniki: Modyfikacje modelu sił społecznych poprzez wprowadzenie mobilnej siatki umożliwiającej dynamiczne dostosowywanie kierunku ruchu znacznie zwiększają realizm symulacji pieszych. Pozwalając na dobrowolne zmiany w kierunku ruchu w zależności od percepcji otoczenia, model lepiej odwzorowuje ludzkie zachowania w zatłoczonych miejscach, otwierając drogę do bardziej skutecznych strategii zarządzania tłumem w przestrzeniach publicznych.

Referencja: Priscila Saboia · Siome Goldenstein, Crowd simulation: applying mobile grids to the social force model, Vis Comput 28, 2012

2.5 An integration of enhanced social force and crowd control models for high-density crowd simulation

Autorzy [5] zauważyli, że tradycyjny Social Force Model nie jest odpowiedni do symulacji ruchu tłumów o wysokiej gęstości z powodu ograniczeń związanych z trzema podstawowymi cechami SF: celem, przyciąganiem i odpychaniem. W przypadku gęstych tłumów, które charakteryzują się złożonością i unikalnymi cechami, takimi jak pojemność, gęstość oraz różnorodność demograficzna agentów, model SF nie spełnia wymagań. W związku z tym, w swoim badaniu proponują udoskonalony model, który wprowadza cztery nowe cechy: płeć, prędkość chodzenia, zamiar oraz grupowanie, aby uczynić symulacje bardziej realistycznymi. W gęstych tłumach często występują również nieregularne zachowania, takie jak zatrzymywanie się w ruchu. Aby poradzić sobie z tymi sytuacjami, zaproponowano model, który kontroluje każdego agenta w dwóch stanach: chodzenia i zatrzymywania się. Dodatkowo, zatrzymywanie się zostało podzielone na dwa typy: wolne zatrzymywanie i nagłe zatrzymywanie. Obydwa modele zostały zintegrowane, tworząc symulator tłumów o wysokiej gęstości. Autorzy swój model przetestowali na danych obrazujących tłum przy okazji rytuału Tawaf.

Główne metody: Social force model, Motion Stopper Model

Wyniki: Większy realizm symulacji tłumów o wysokiej gęstości uzyska się integrując model Sił Społecznych Zahmaha (ZSFM) z modelem zatrzymywania ruchu (MSM). Taka integracja tworzy nową technikę symulacyjną, która lepiej odzwierciedla rzeczywiste zachowania tłumów, uwzględniając wcześniej pomijane cechy uczestników tłumy.

Referencja: Hoshang Kolivand, Mohd Shafry Rahim, Mohd Shahrizal Sunar, Ahmad Zakwan Azizul Fata, Chris Wren, An integration of enhanced social force and crowd control models for high-density crowd simulation, *Neural Comput Applic* 33, 6095–6117 (2021)

2.6 Social Distances Model of Pedestrian Dynamics

W [6] przedstawiony model opisuje dynamikę ruchu pieszych w ograniczonym obszarze za pomocą niejednorodnych, asynchronicznych automatów komórkowych. Piesi są reprezentowani przez elipsy na kwadratowej siatce, co wymaga uwzględnienia pewnych ograniczeń geometrycznych dla każdej komórki. W modelu wprowadzono innowacyjną koncepcję dystansów społecznych, a dynamika modelu jest inspirowana zasadami proksemiki (inaczej znanej jako bliskości). Opisawszy podział odległości osób między sobą tzn. przywołując teorię dystansów społecznych dr Edwarda Halla, autorzy stworzyli model. Przykładem zastosowanym w symulacji było zachowanie pieszych w krakowskim tramwaju. Model zakładał trzy stany pieszych: „Idź do celu”, „Czekaj w celu pośrednim” oraz „Czekaj”. Algorytm ruchu pieszych różnił się w zależności od stanu. Dystanse społeczne miały bezpośredni wpływ na stan „Czekaj”, co zmieniało zachowanie pieszych w tłumie.

Główne metody: Automaty Komórkowe, Social Distance Modelling

Wyniki: Symulacje ukazały jak idea siły dystansu społecznego wpływa na interakcje między pieszymi. Zastosowanie teorii dystansów społecznych poprawiło realizm symulacji, a wyniki pokazały, że pasażerowie w tramwaju zachowywali się zgodnie z wprowadzonymi zasadami i przewidywaniami. Głównym ograniczeniem modelu jest brak strategicznych umiejętności pieszych, gdyż w eksperymencie piesi zawsze zbliżają się do najbliższego celu, co nie zawsze jest optymalne w ujęciu globalnym. Praca ta przyczynia się do lepszego zrozumienia dynamiki ruchu pieszych w kontekście zastosowań praktycznych w projektowaniu obiektów publicznych, w szczególności poprzez

zastosowanie teorii dystansów społecznych w modelowaniu interakcji w tłumie.

Referencja: Jarosław Wąs, Bartłomiej Gudowski, Paweł J. Matuszyk, Social Distances Model of Pedestrian Dynamics, El Yacoubi, S., Chopard, B., Bandini, S. (eds) Cellular Automata. ACRI 2006. Lecture Notes in Computer Science, vol 4173. Springer

3. PODSUMOWANIE

Symulacje dyskretne stanowią kluczowe narzędzie do modelowania i analizy dynamiki tłumu, szczególnie w sytuacjach wymagających planowania ewakuacji oraz optymalizacji przepływu pieszych w przestrzeniach publicznych. Przegląd literatury pokazuje, że stosowane modele, takie jak automaty komórkowe, model sił społecznych i dystanse społeczne, pozwalają na realistyczne odwzorowanie zachowań tłumu w różnorodnych sytuacjach, od codziennych warunków do scenariuszy wysokiego zagęszczenia. Wprowadzenie takich technik jak dynamiczne pola potencjalne, mobilne siatki czy eliptyczna reprezentacja pieszych, znacząco poprawia precyzję symulacji, pozwalając lepiej przewidywać i zarządzać zachowaniem tłumu. Dzięki tym modelom możliwe jest bardziej efektywne projektowanie przestrzeni publicznych oraz podnoszenie bezpieczeństwa uczestników, szczególnie podczas wydarzeń masowych i w obiektach użyteczności publicznej.

Powyższe rozpoznanie literaturowe, jak i lektura nieuwzględnionych w zestawieniu prac, umożliwiła nam dokładniejsze poznanie przedmiotu naszych badań. Zaproponowane w artykułach rozwiązania problemów symulacji, jak i analiza największych z nich, wyposażyła nas w niezbędną wiedzę i uświadomiła co do potencjalnych trudności, z jakimi możemy się spotkać w czasie rozwijania naszego modelu.

Bibliografia

- [1] H.-D. Y. Tao Yu, “Simulation of running crowd dynamics:potential-based cellular automata model,” *IEEE Access*, 2020.
- [2] J. P. Robert Lubaś, Jarosław Wąs, “Cellular automata as the basis of effective and realistic agent-based models of crowd behavior,” *The Journal of Supercomputing*, 2016.
- [3] P. M. Dirk Helbing, “Social force model for pedestrian dynamics,” *Physical review A, Atomic, molecular, and optical physics* 51(5), 1998.
- [4] P. S. S. Goldenstein, “Crowd simulation: applying mobile grids to the social force model,” *Vis Comput* 28, 2012.
- [5] M. S. S. A. Z. A. F. C. W. Hoshang Kolivand, Mohd Shafry Rahim, “An integration of enhanced social force and crowd control models for high-density crowd simulation,” *Neural Comput Applic* 33, 6095–6117, 2021.
- [6] P. J. M. Jarosław Wąs, Bartłomiej Gudowski, “Social distances model of pedestrian dynamics,” *El Yacoubi, S., Chopard, B., Bandini, S. (eds) Cellular Automata. ACRI 2006. Lecture Notes in Computer Science, vol 4173. Springer, 2006.*