

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA**

im. Stanisława Staszica

w Krakowie

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki

Katedra Automatyki



Rozprawa doktorska

**Jarosław WĄS**

**Algorytmy modelowania inteligentnych  
zachowań w zagadnieniach dynamiki pieszych z  
zastosowaniem niehomogenicznych automatów  
komórkowych**

Promotor

Prof. dr hab. inż. Ewa Dudek-Dyduch

**Kraków 2006**

*Składam serdeczne podziękowania Pani Prof. Ewie Dudek – Dyduch  
za pomoc w napisaniu tej pracy, za poświęcony czas i życzliwość.  
Dziękuję również Koleżankom i Kolegom z zespołu za wszelką  
pomoc okazaną mi w trakcie pisania tej pracy.*

*autor*

# Spis treści

Spis rysunków	5
Spis tabel	7
Zestawienie ważniejszych symboli i oznaczeń	8
<b>1 Wstęp</b>	<b>10</b>
1.1 Wprowadzenie . . . . .	10
1.2 Geneza i cel pracy. . . . .	13
1.3 Zawartość pracy . . . . .	16
<b>2 Automaty komórkowe w modelowaniu</b>	<b>18</b>
2.1 Automaty komórkowe . . . . .	18
2.1.1 Definicje pojęcia automatu komórkowego . . . . .	19
2.1.2 Klasyfikacja automatów komórkowych . . . . .	21
2.1.3 Charakterystyka automatów komórkowych . . . . .	26
2.2 Systemy wieloagentowe . . . . .	27
<b>3 Modelowanie dynamiki pieszych</b>	<b>30</b>
3.1 Wprowadzenie . . . . .	30
3.2 Charakterystyczne zjawiska w ruchu pieszych . . . . .	32
3.3 Rozwiązania architektoniczne w obiektach użyteczności publicznej . . . . .	34
3.4 Przegląd modeli dynamiki pieszych . . . . .	37
3.4.1 Modele ciągłe względem czasu . . . . .	38
3.4.2 Modele dyskretne względem czasu . . . . .	39
<b>4 Proponowana definicja CA</b>	<b>42</b>
4.1 Przesłanki do stworzenia nowego modelu $CAL_{const}$ i jego formalizacji . . . . .	42
4.2 Definicja automatu komórkowego ze stałą siatką $CAL_{const}$ . . . . .	43
4.3 Rozszerzony model automatu komórkowego . . . . .	47

<b>5</b>	<b>Proponowane modele dynamiki pieszych</b>	<b>50</b>
5.1	Wprowadzenie . . . . .	50
5.2	Model bazowy . . . . .	51
5.2.1	Klasyczna i nieklasyczna formuła CA w dynamice pieszych . . . . .	51
5.2.2	Ogólna charakterystyka modelu . . . . .	52
5.2.3	Formalny zapis modelu bazowego . . . . .	53
5.3	Model SPA . . . . .	56
5.3.1	Ogólna charakterystyka modelu . . . . .	56
5.3.2	Formalny opis modelu . . . . .	57
5.4	Model SPA-BNE . . . . .	60
5.4.1	Ogólna charakterystyka modelu . . . . .	60
5.4.2	Formalny zapis modelu SPA-BNE . . . . .	62
5.4.3	Algorytm ruchu z uwzględnieniem blokad . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Dynamika tłumów – eksperymenty</b>	<b>67</b>
6.1	Charakterystyka badań eksperymentalnych . . . . .	67
6.1.1	Ogólny opis badań eksperymentalnych . . . . .	68
6.2	Symulacja paniki – eksperyment pierwszy . . . . .	70
6.2.1	Analiza zapisu video i ankiet . . . . .	71
6.2.2	Podsumowanie eksperymentu pierwszego – symulacja paniki . . . . .	71
6.3	Symulacja paniki – eksperyment drugi . . . . .	73
6.3.1	Analiza zapisu video . . . . .	73
6.3.2	Podsumowanie eksperymentu drugiego – symulacja paniki . . . . .	73
6.4	Symulacja kontrolowanej ewakuacji – eksperyment trzeci . . . . .	74
6.4.1	Analiza zapisu video i ankiet . . . . .	75
6.4.2	Podsumowanie eksperymentu trzeciego – kontrolowana ewakuacja . . . . .	76
6.5	Sytuacja zwyczajnego opuszczania pomieszczenia – eksperyment czwarty . . . . .	77
6.5.1	Analiza zapisu video i ankiet . . . . .	77
6.5.2	Podsumowanie eksperymentu czwartego – normalne opuszczanie pomieszczenia . . . . .	77
6.6	Wnioski . . . . .	79
<b>7</b>	<b>Implementacja i badania symulacyjne</b>	<b>83</b>
7.1	Implementacja modeli – opis aplikacji . . . . .	83
7.1.1	Informacje ogólne . . . . .	83
7.1.2	Opis struktury wewnętrznej aplikacji . . . . .	84

<i>SPIS TREŚCI</i>	3
7.1.3 Graficzny interfejs użytkownika – opis . . . . .	85
7.2 Symulacje komputerowe . . . . .	88
7.2.1 Informacje wstępne . . . . .	88
7.2.2 Symulacja kontrolowanej ewakuacji . . . . .	90
7.2.3 Symulacja sytuacji normalnej . . . . .	92
7.2.4 Symulacja paniki . . . . .	96
7.3 Wnioski . . . . .	98
<b>8 Podsumowanie</b>	<b>100</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>104</b>
<b>A</b>	<b>113</b>

# Spis rysunków

2.1	Schematy sąsiedztwa Moore'a i von Neumanna . . . . .	25
3.1	Tworzenie się strug w dwukierunkowym ruchu pieszych . . . .	33
3.2	Rozwiązania architektoniczne pomocne w bezpiecznym opuszczeniu pomieszczenia przez tłum ludzi – zastosowanie kolumny i barierki . . . . .	35
3.3	Przykłady rozwiązań architektonicznych regulujących przepływ pieszych . . . . .	35
3.4	Uporządkowanie dwukierunkowego ruchu pieszych poprzez zastosowanie kolumn . . . . .	36
5.1	Przykładowa topologia pomieszczenia. . . . .	53
5.2	Algorytm ruchu pojedynczego pieszego dla modelu bazowego	55
5.3	Algorytm ruchu pojedynczego pieszego dla modelu SPA . . .	60
5.4	Przykłady wąskich gardeł na siatce, gdzie komórki mają przypisane wartości pola potencjalnego . . . . .	62
5.5	Algorytm ruchu pojedynczego pieszego dla modelu SPA-BNE	66
6.1	Topologia pomieszczenia w którym prowadzono eksperymenty ewakuacji grupy studentów. . . . .	69
6.2	Czasy ewakuacji uczestników w zależności od położenia początkowego dla symulacji paniki – eksperyment pierwszy . . .	72
6.3	Czasy ewakuacji uczestników w zależności od położenia początkowego dla symulacji paniki – eksperyment drugi . . . . .	74
6.4	Czasy ewakuacji uczestników w zależności od położenia początkowego dla symulacji kontrolowanej ewakuacji. . . . .	75
6.5	Czasy ewakuacji uczestników w zależności od położenia początkowego dla symulacji normalnego opuszczania pomieszczenia . . . . .	78
7.1	Struktura głównej części aplikacji „Piesi” przedstawiona wg schematu Coad–Yourdona . . . . .	84

7.2	Główne menu aplikacji „Piesi” . . . . .	86
7.3	Ewakuacja budynku – okno główne aplikacji. . . . .	89
7.4	Aplikacja – widok z widocznym polem potencjalnym oraz numerami identyfikacyjnymi pieszych. . . . .	89
7.5	Typowy obraz ewakuacji dla modelu bazowego, piesi zmierzają do wyjść kierując się jedynie odległością. . . . .	95
7.6	Charakterystyczna dla modelu SPA sytuacja – piesi na bieżąco analizują sytuację. Można zaobserwować równomierne „obciążenie” obydwu wyjść. . . . .	95
7.7	Symulacja paniki. Charakterystyczna dla dużego stopnia determinacji pieszych jest blokada tylnego wyjścia . . . . .	98

# Spis tabel

2.1	Definicja automatów komórkowych wg Weimara . . . . .	20
6.1	Statystyki ankiet dla symulacji paniki . . . . .	72
6.2	Statystyki analizowanych ankiet – kontrolowana ewakuacja . .	76
6.3	Statystyki odpowiedzi ankiet – sytuacja normalnego opuszczania pomieszczenia . . . . .	79
6.4	Kryteria wyboru wyjść dla poszczególnych sytuacji – dane z ankiet . . . . .	81
6.5	Czasy ewakuacji dla poszczególnych eksperymentów. Tłustym drukiem zaznaczono całkowite czasy ewakuacji. . . . .	81
7.1	Zestawienie najważniejszych parametrów i wyników symulacji dla sytuacji kontrolowanej ewakuacji pomieszczenia w oparciu o modele symulacyjne i dane eksperymentalne . . . . .	92
7.2	Zestawienie najważniejszych parametrów i wyników symulacji dla sytuacji normalnego opuszczania pomieszczenia w oparciu o dane rzeczywiste i modele symulacyjne . . . . .	93
7.3	Zestawienie najważniejszych parametrów i wyników symulacji dla sytuacji ewakuacji w panice w oparciu o dane rzeczywiste i modele symulacyjne. W eksperymencie rzeczywistym i symulacji zwiększona przepustowość jednego z wyjść. . . . .	96
7.4	Zestawienie najważniejszych parametrów i wyników symulacji dla sytuacji ewakuacji w panice, dla standardowej przepustowości drzwi, w oparciu o dane rzeczywiste i modele symulacyjne . . . . .	97
A.1	Ranking pieszych z czasami opuszczania pomieszczenia przez poszczególnych uczestników w eksperymencie pierwszym – symulacji paniki . . . . .	114



A.2	Ranking pieszych z czasami opuszczania pomieszczenia przez poszczególnych uczestników w eksperymencie drugim – symulacji paniki . . . . .	115
A.3	Ranking pieszych z czasami opuszczania pomieszczenia przez poszczególnych uczestników w eksperymencie trzecim – kontrolowanej ewakuacji . . . . .	116
A.4	Ranking pieszych z czasami opuszczania pomieszczenia przez poszczególnych uczestników w eksperymencie czwartym – normalnym opuszczaniu pomieszczenia . . . . .	117
A.5	Analiza ankiet z odpowiedziami poszczególnych pieszych dotycząca eksperymentu pierwszego – symulacji paniki. Pytania do ankiet znajdują się w sekcji 6.1.1 . . . . .	118
A.6	Analiza ankiet z odpowiedziami poszczególnych pieszych dotycząca eksperymentu trzeciego – kontrolowanej ewakuacji. Pytania do ankiet znajdują się w sekcji 6.1.1 . . . . .	119
A.7	Analiza ankiet z odpowiedziami poszczególnych pieszych dotycząca eksperymentu czwartego – normalnego opuszczania pomieszczenia. Pytania do ankiet znajdują się w sekcji 6.1.1 . . .	120
A.8	Zestawienie czasów kontrolowanej ewakuacji dla poszczególnych pieszych . . . . .	121
A.9	Zestawienie czasów normalnego opuszczania pomieszczenia dla poszczególnych pieszych . . . . .	122
A.10	Zestawienie czasów symulacji paniki dla poszczególnych pieszych przy zmniejszonej przepustowości drzwi . . . . .	123
A.11	Zestawienie czasów symulacji paniki dla poszczególnych pieszych przy standardowej przepustowości drzwi . . . . .	124

## Zestawienie ważniejszych symboli i oznaczeń

W poniższym spisie umieszczono tylko oznaczenia używane w pracy przez autora. Spis nie uwzględnia różnych oznaczeń spotykanych w literaturze, a przytoczonych w pracy.

$A$	– podzbiór komórek, których stan wpływa na stan wybranych komórek siatki
$A(e_x)$	– podzbiór komórek należących do otoczenia wyjścia $e_x$
$BN$	– zbiór komórek będących wąskimi gardłami $BN \subset MS$
$c, c_k$	– pojedyncza komórka siatki
$C$	– zbiór komórek siatki
$CAL_{const}$	– automat komórkowy ze stałą w czasie siatką
$con$	– odwzorowanie, które każdej komórce $c$ przyporządkowuje stan $s$
$CON$	– zbiór konfiguracji
$con_t/\eta^*(c_k)$	– konfiguracja w chwili $t$ ograniczona do komórek $\eta^*(c_k)$ ,
$cost(c_k, e_x)$	– funkcja kosztu wyboru wyjścia $e_x$ dla pieszego znajdującego się w komórce $c_k$
$dist(c_k, e_x)$	– najmniejsza liczba komórek stanowiących drogę od komórki $c_k$ do którejkolwiek komórki wyjścia $e_x$
$dens(e_x)$	– funkcja charakteryzująca gęstość tłumu w otoczeniu $A(e_x)$ wokół danego wyjścia $e_x$
$dens_{BN}(c_n)$	– zagęszczenie tłumu wokół komórki $c_n$ , będącej wąskim gardłem
$e_x$	– wyjście z pomieszczenia złożone z jednej lub kilku komórek
$E$	– zbiór wyjść z pomieszczenia
$ECAL_{const}$	– rozszerzony, niehomogeniczny automat komórkowy
$f$	– funkcja przejścia określająca zmiany zbioru konfiguracji
$L$	– siatka automatu komórkowego
$MS$	– zbiór komórek reprezentujących przestrzeń ruchu w modelu
$O$	– zbiór komórek reprezentujących przeszkody w pomieszczeniu
$p$	– lokalne prawdopodobieństwo zaistnienia blokady w ruchu pieszych
$p_{glob}$	– globalne prawdopodobieństwo blokady, określane w zależności od stopnia determinacji pieszych, stanowiące parametr w badaniach symulacyjnych

$P(c_k)$	–	wartość potencjału przypisanego komórce $c_k$
$r$	–	lokalna reguła wyznaczająca stan komórki, na podstawie stanu poprzedniego i konfiguracji sąsiedztwa komórki
$r_{ext}$	–	rozszerzona reguła lokalna, która zmienia stan komórki nie tylko w zależności od stanu komórek sąsiedztwa, a także innych wyróżnionych komórek siatki
$R$	–	promień otoczenia Moore'a komórki $c_k$
$R_p$	–	relacja przyległości w zbiorze $C$
$R_{pp}$	–	relacja pośredniej przyległości
$s$	–	stan pojedynczej komórki $c_k$
$S$	–	zbiór stanów komórki $c_k$
$t$	–	chwila czasowa
$W$	–	komórki reprezentujące ściany pomieszczenia
$w_1, w_2$	–	współczynniki wagi w funkcji kosztu $cost$
$Y(c_n)$	–	stopień wąskiego gardła dla komórki $c_n$
$\eta(c_k)$	–	otoczenie Moore'a komórki $c_k$
$\eta^*(c_k)$	–	pełne otoczenie Moore'a komórki z włączeniem komórki $c_i$ $\eta^*(c_k) = \eta(c_k) \cup \{c_k\}$ ,

# Rozdział 1

## Wstęp

### 1.1 Wprowadzenie

Niniejsza praca związana jest z modelowaniem systemów złożonych przy użyciu technologii niehomogenicznych automatów komórkowych.

Wiele naturalnych zjawisk zachodzących w świecie można opisywać jako systemy złożone (*ang. complex systems*). Przykładem takich zjawisk mogą być występujące w geologii procesy górotwórcze czy zjawiska wulkaniczne, w fizyce złożony ruch cząstek w postaci zorganizowanej (np. tornado) lub chaotycznej (np. wysoce turbulentny przepływ), w biologii rozprzestrzenianie się epidemii czy specyfika zachowań zwierząt, w antropologii dynamika tłumu czy modele ekonomiczne. Pojęcie systemu złożonego jest więc pojęciem dotyczącym wielu dyscyplin naukowych.

Każdy z systemów złożonych składa się z pewnej liczby elementów składowych i tak przykładowo: elementami systemu złożonego jakim jest mózg są poszczególne neurony, z kolei elementami cząstki są poszczególne atomy, natomiast elementami systemu społecznego są poszczególni ludzie [Hel92, NECSI, AHS05, Sig04].

Warto przytoczyć definicję systemów złożonych za New England Complex System Institute, dla wierności tekstu w oryginale: *Complex systems is a field of science studying how parts of a system give rise to the collective behaviors of the system, and how the system interacts with its environment. The field of complex systems cuts across all traditional disciplines of science, as well as engineering, management, and medicine. It focuses on certain questions about parts, wholes and relationships.*(definicja za [NECSI])

Ogólnie rzecz ujmując, większość zjawisk występujących w świecie można rozumieć jako systemy złożone. Prawa fizyki są stosunkowo proste i jak zauważają fizycy Uniwersytetu Illinois w publikacji „Simple lessons from com-

plexity”: *prostota praw fizyki kontrastuje ze złożonością świata* [GK99].

Klasyczne podejście modelowania zjawisk rzeczywistych opierające się na stworzeniu modelu fizycznego, poprzez zastosowanie odpowiednich równań różnicowych czy różniczkowych, sprawdza się tylko dla niektórych zjawisk, i to często jedynie przy uwzględnieniu idealistycznych założeń.

Wolfram w swojej książce *A new kind of science* [Wol02] stawia śmiałą tezę sugerując, że:

- Klasyczne metody matematyczne opisu oparte na równaniach różniczkowych, są niewystarczające do opisu świata i przyszłość modelowania należy do nowego, uniwersalnego narzędzia opisu zjawisk zachodzących w świecie, jakim są *automaty komórkowe*.
- Bardzo proste programy mogą wykazywać bardzo złożone zachowania i dlatego do takich prostych programów należy przyszłość modelowania systemów złożonych.

W pewnym sensie teza Wolframa znajduje potwierdzenie, ponieważ w praktycznych zastosowaniach, zarówno w nauce i technice, w modelowaniu systemów złożonych stosuje się często mechanizmy automatów komórkowych. Natomiast bardzo często modele te wykraczają poza klasyczne rozumienie automatu komórkowego, poprzez dodanie rozmaitych elementów do tworzonego modelu. Powoduje to odejście od absolutnej prostoty reguł i tym samym powstałe w ten sposób programy nie możemy uznać za bardzo proste, jak chciałby tego Wolfram.

Automat komórkowy jest pojęciem matematycznym. W jednej z najbardziej popularnych definicji specyfikują go następujące elementy<sup>1</sup> (definicja wg Kułakowskiego [Kuł00]):

1. *Siatka komórek* przestrzeni  $D$  – wymiarowej,
2. *Zbiór  $s_i$  stanów* pojedynczej komórki, zawierający  $k$ -elementów
3. *Reguła  $F$*  określająca stan komórki w chwili  $t + 1$  w zależności od stanu danej komórki i komórek ją otaczających w chwili  $t$ :

$$s_i(t+1) = F(s_j(t)), j \in O(i) \quad \text{gdzie} \quad O(i) \text{—otoczenie } i\text{-tej komórki} \quad (1.1)$$

Inne definicje automatu komórkowego umieszczono w sekcji 2.1.1.

---

<sup>1</sup>zachowano oznaczenia zgodne z oryginałem

Początki automatów komórkowych sięgają przełomu lat 40 i 50 XX-tego wieku. Twórcą pierwszych automatów komórkowych był amerykański naukowiec węgierskiego pochodzenia John von Neumann, który podążając za sugestiami polskiego matematyka Stanisława Ulama, dotyczącymi dyskretyzacji czasu i przestrzeni, stworzył pierwszy samo-replikujący się system. Finalnym celem prac von Neumanna miało być wygenerowanie maszyny zdolnej do tworzenia maszyn o identycznych właściwościach. Prace te zakończyły się stworzeniem projektów samo-replikujących się automatów bez ich praktycznej realizacji. Natomiast efektem prowadzonych prac było stworzenie podstaw dziedziny wiedzy jaką jest teoria automatów komórkowych. Szersze zainteresowanie automatami komórkowymi nastąpiło po roku 1970, kiedy John Conway opublikował artykuł o automacie nazwanym *Game of life* [Gar70].

Modele systemów złożonych, oparte na automatach komórkowych są obecnie wykorzystywane w wielu dziedzinach nauki. Już dawno dostrzeżono w nich skuteczną metodę opisywania tychże systemów.

Wśród przykładów zastosowań możemy wymienić modelowanie systemów fizycznych. Należy tu wiele rozmaitych modeli. Wśród nich wymienić można między innymi model gazu siatkowego HPP zaproponowany w latach 70-tych XX-go wieku przez trzech naukowców: Hardy’ego, Pomeau oraz de Pazzis’a [HPdP73], opisujący poruszanie się cząstek gazu w przestrzeni. Opisywane cząsteczki gazu poruszają się po dwuwymiarowej, kwadratowej siatce. Interakcje między cząstkami mogą zachodzić jedynie w węzłach siatki. Przy zderzeniach uwzględnione zostały prawa fizyczne: prawo zachowania masy i prawo zachowania pędu. Nieco bardziej rozbudowana koncepcja gazu to FHP zaproponowana w 1986 przez Frisch’a, Hasslachera, Pomeau [FHP86]. Koncepcja ta bazuje na sześciokątnej siatce automatu komórkowego. Proces symulacji, podobnie jak w modelu HPP składa się z dwóch faz: zderzeń i przesunięcia cząstek. Analogicznie w modelu FHP zachowane zostały również zasady zachowania masy i pędu. Ze względu na bardziej złożoną geometrię reguły zderzeń są bardziej skomplikowane w modelu FHP niż w HPP. Opisywane powyżej modele znajdują zastosowanie do symulacji przepływów cząstek, mieszania substancji i przepływów turbulentnych.

Bardzo duży zakres zastosowań znalazły automaty komórkowe w naukach przyrodniczych. Wśród zastosowań można wymienić modelowanie takich zjawisk jak: płynąca lawa w pracy [SDRT04], ruch stada ptaków z uwzględnieniem omijania przeszkód [Rey87], pożary lasów [CSST02], zjawiska przepływu i geneza powstawania rzeki anastomozującej [Top01, TD04], morfogeneza szkieletów otwornic [TTaA04] czy rozprzestrzenianie się epidemii [Dzw04].

Automaty komórkowe znalazły również swoje miejsce w technice, gdzie stosuje się je na przykład w elektronice w propagacji sygnałów [APL04] czy inżynierii komunikacyjnej przykładowo w symulacji ruchu samochod-

wego [NS92].

Kolejnym polem zastosowań automatów komórkowych jest kryptografia [MC06]. Niehomogeniczne automaty komórkowe przykładowo znalazły zastosowanie do generowania kluczy publicznych w systemach kryptograficznych [Wol85],[Gut93].

Bardzo mocno rozwija się kierunek badań związanych z modelowaniem dynamiki pieszych, opartym na automatach komórkowych. Obecnie prowadzonych jest wiele dużych projektów badawczych związanych z tą tematyką, na które to badania przeznaczone są ogromne nakłady finansowe. Większość dużych projektów dotyczy symulacji pieszych w obiektach użyteczności publicznej i obejmuje zarówno codzienny, normalny ruch ludzi i jak również sytuacje ewakuacyjne. Wśród takich projektów wymienić można szwajcarski projekt SimWalk [sim], niemiecki projekt BYPASS [tra] czy angielski Exodus [exo]. Z kolei inne prowadzone projekty dotyczą specjalizowanych zagadnień np symulacji ruchu turystycznego w Alpach – międzynarodowy projekt AlpSim [SNL<sup>+</sup>04] czy ewakuacji pieszych z okrętów pasażerskich AENEAS [KMK].

## 1.2 Geneza i cel pracy.

Bezpośrednią przyczyną podjęcia badań przedstawionych w niniejszej pracy była chęć stworzenia matematycznych modeli ruchu pieszych dla wybranych klas sytuacji, przy czym założono, że modele te oparte będą na technologii automatów komórkowych. Jednakże okazało się, że **brak jest odpowiedniej formalizacji dla automatów niehomogenicznych**, która pozwoliłaby na ścisłe przedstawienie modeli oraz na ich formalne porównywanie (pojęcie niehomogenicznych automatów komórkowych opisano poniżej, natomiast dokładniejsze omówienie tej grupy automatów zamieszczono w rozdziale 2.1.2).

Dlatego też pojawiła się konieczność opracowania nowych, formalnie przedstawionych, definicji automatu komórkowego. Pierwsza z tychże definicji powinna obejmować klasyczny (homogeniczny) automat komórkowy i równocześnie stanowić bazę dla formalnego opisu niehomogenicznych automatów komórkowych. Z kolei druga z zaproponowanych definicji powinna opisywać szeroką klasę niehomogenicznych automatów komórkowych. Ponadto obydwie definicje powinny korzystać z tego samego aparatu pojęciowego, aby umożliwić porównywanie różnorodnych automatów. Na bazie drugiej, zaproponowanej definicji będzie możliwe tworzenie różnorodnych modeli, bazujących na niehomogenicznych automatach komórkowych.

Definicje, które można spotkać w literaturze opisują jedynie klasyczny, homogeniczny automat komórkowy (definicje te opisano w rozdziale 2.1.1).

Klasyczne definicje automatów komórkowych, tzw. automatów homogenicznych, opisane w punkcie 2.1 zakładają w szczególności:

- jednorodność modelu polegającą na jednakowej definicji sąsiedztw dla wszystkich komórek,
- jednakowe dla każdej komórki odwzorowanie lokalne  $r$ , przyporządkowujące jej następujący stan w zależności od stanu sąsiedztwa,
- jednakowy zbiór stanów dla każdej komórki,
- stałą, niezmienną w czasie siatkę automatu.

Cechy te uniemożliwiają precyzyjne modelowanie systemów złożonych. Jako *niehomogeniczne automaty komórkowe* rozumie się automaty, które nie spełniają jednej lub więcej z wyżej wymienionych cech.

Obecnie nazwą technologia automatów komórkowych określa się pewną filozofię modelowania zjawisk fizycznych [Top05], która przewiduje wydzielenie z modelowanego zjawiska najważniejszych czynników i mechanizmów, a następnie przedstawienie ich w postaci reguł. W gruncie rzeczy oznacza to, dla wielu zastosowań, odejście od homogenicznych (*ang. homogeneous*) do niehomogenicznych (*ang. nonhomogeneous*) automatów komórkowych. Patrząc od strony formalnej oznacza to odejście od lokalnie zdefiniowanej reguły.

Z analizy literatury wynika, że autorzy opisując swoje modele, które bazują na niehomogenicznych automatach komórkowych (patrz przykłady powyżej oraz w sekcji 2.1.2), przy opisie tych modeli posługują się najczęściej klasyczną definicją CA: [DJT01, DJT00, KMKWS00, WG04, GW05] itd. lub w większości przypadków w ogóle nie stosują formalnego opisu modelu np. [BKSZ01, FI99, GSN04, NSM04].

Dlatego jednym z celów niniejszej pracy jest zaproponowanie nowej definicji automatu komórkowego, nazwanego przez autora *automatem ze stałą siatką*  $CAL_{const}$ . Kolejnym celem pracy jest stworzenie modelu tzw. rozszerzonego automatu komórkowego  $ECAL_{const}$  (*ang. Extended Cellular Automaton*) na bazie zaproponowanego automatu ze stałą siatką. Definicja ta ma umożliwić tworzenie modeli z wykorzystaniem niehomogenicznych automatów komórkowych.

Z kolei na bazie tzw. rozszerzonego automatu komórkowego  $ECAL_{const}$  będą tworzone modele za pomocą których można reprezentować inteligentne zachowania pieszych.

Formalny opis modelu jest rozumiany w niniejszej pracy jako pewien typ reprezentacji wiedzy o rozpatrywanym systemie złożonym [Mul96]. Natomiast inteligentne zachowanie pieszych jest rozumiane jako działanie podjęte na



skutek analizy otoczenia z uwzględnieniem zarówno topologii przestrzennej oraz położenia i ruchu innych jednostek. Inteligencja jest tu rozumiana jako *zdolność rozpoznawania obserwowanego wycinka rzeczywistości, jego rozumienia, określania właściwych celów oraz poszukiwania sposobów osiągnięcia tych celów*<sup>2</sup>.

Podsumowując, cel niniejszej pracy przedstawić można za pomocą trzech punktów:

1. Zaproponowanie formalnej definicji automatu komórkowego ze stałą siatką  $CAL_{const}$ , obejmującej klasyczny (homogeniczny) automat komórkowy oraz pewną klasę niehomogenicznych automatów komórkowych. Jednocześnie ważne jest, aby na bazie zaproponowanej formalizacji możliwe było stworzenie definicji szerokiej klasy niehomogenicznych automatów komórkowych.
2. Zaproponowanie koncepcji tzw. rozszerzonego automatu komórkowego  $ECAL_{const}$ , jako formalnego modelu szerokiej klasy niehomogenicznych automatów komórkowych.
3. Opracowanie nowych matematycznych modeli dynamiki pieszych, dla wybranych klas sytuacji, w oparciu o ideę automatów komórkowych.

**Teza pracy** *Wykorzystując zaproponowaną formalizację automatów komórkowych oraz bazując na obserwacjach profilu zachowań ludzi oraz eksperymentach rzeczywistych, można określić modele matematyczne dynamiki ruchu jednostek w różnych sytuacjach. W szczególności można modelować inteligentne zachowania ludzi.*

Aby wykazać powyższą tezę zrealizowano następujące etapy badań.

- zaproponowano formalny opis modelu ruchu jednostek za pomocą technologii automatów komórkowych,
- stworzono szereg modeli poprzez podanie hipotetycznych wzorów określających funkcję przejścia,
- przeprowadzono identyfikację algorytmu zachowań pieszych w oparciu o rzeczywiste eksperymenty przeprowadzone przez autora,
- stworzono aplikację i wykonano szereg eksperymentów.

---

<sup>2</sup>definicja za [Mul96]

## 1.3 Zawartość pracy

Praca składa się z ośmiu rozdziałów, bibliografii oraz skorowidzu oznaczeń.

*Rozdział drugi* poświęcony jest teorii automatów komórkowych. Przedstawiono w nim stosowane definicje automatów komórkowych. Następnie zaprezentowane zostały spotykane w literaturze klasyfikacje automatów komórkowych. Wśród omawianych klasyfikacji szczególną uwagę poświęcono odmienności homogenicznych oraz niehomogenicznych automatów komórkowych. Z racji tego, że modele dynamiki pieszych oparte na niehomogenicznych automatach komórkowych dobrze korespondują z systemami wieloagentowymi ze względu na cechy podejmowania decyzji, w rozdziale drugim omówiono również pewne zagrożenia związane z tymi systemami.

*W rozdziale trzecim* omówiono zagrożenia modelowania dynamiki pieszych. Opisano niektóre reguły ruchu ludzi w sytuacjach normalnych i ewakuacyjnych, a także charakterystyczne zjawiska w dynamice pieszych. Następnie poświęcono uwagę sterowaniu ruchem ludzi poprzez zastosowanie rozmaitych rozwiązań architektonicznych. Omówiono również ciągłe i dyskretne metody modelowania dynamiki pieszych. Szczególną uwagę zwrócono na modelowanie z wykorzystaniem technologii automatów komórkowych oraz przedstawiono modele znane z literatury.

*W rozdziale czwartym* przedstawiono przesłanki stworzenia nowych modeli automatów komórkowych oraz zaproponowano nową definicję automatu komórkowego, nazwanego *automatem ze statą siatką*  $CAL_{const}$ . Umożliwia ona opisywanie modeli opartych na klasycznych automatach komórkowych i pewnej klasy niehomogenicznych automatów komórkowych. Równocześnie definicja ta stanowi punkt wyjścia do zdefiniowania szerokiej klasy niehomogenicznych automatów komórkowych. Następnie zaproponowano formalny opis niehomogenicznego automatu komórkowego  $ECAL_{const}$ , nazwanego *rozszerzonym modelem automatu komórkowego*.

*W rozdziale piątym* zaproponowano szereg modeli dynamiki pieszych opisujących opuszczanie pomieszczenia przez grupę pieszych. Jako pierwszy opisano model nazwany bazowym, który w znacznej części opiera się na modelach znanych z literatury przedmiotu. Następnie zaproponowano model strategicznych zdolności pieszych nazwany SPA (*ang. Strategic Pedestrian Abilities*), w którym piesi podejmują decyzje co do ruchu na podstawie pewnej funkcji kosztu. Kolejnym z opisywanych modeli jest model genezy generowania konfliktów SPA-BNE (*ang. BottleNeck Effect*) rozpatrujący zachowanie ludzi w sytuacjach ewakuacyjnych.

*W szóstym rozdziale* opisano rzeczywiste eksperymenty dotyczące dynamiki pieszych, które autor przeprowadził z grupą studentów. Przeprowadzone eksperymenty dotyczą opuszczania pomieszczenia przez pieszych w różnych

warunkach: w sytuacji normalnej, w warunkach kontrolowanej ewakuacji oraz w warunkach paniki. W oparciu o zapis filmowy z przebiegu eksperymentu oraz przeprowadzone ankiety uzyskano rzeczywiste dane obrazujące zachowania pieszych oraz ukazujące ich proces decyzyjny. Zgromadzone dane umożliwiły przeprowadzenie walidacji modeli zaproponowanych w rozdziale piątym.

W rozdziale siódmym opisano aplikację bazującą na zaproponowanych w niniejszej pracy modelach formalnych. Omówiono strukturę wewnętrzną programu, a także graficzny interfejs użytkownika. Następnie zaprezentowano symulacje komputerowe modeli dedykowanych dla poszczególnych sytuacji tzn. dla sytuacji normalnego opuszczania pomieszczenia zaproponowano model SPA, natomiast dla sytuacji kontrolowanej ewakuacji oraz dla paniki model SPA-BNE. Następnie przeprowadzono dyskusję uzyskanych wyników w porównaniu z danymi rzeczywistymi zaprezentowanymi w rozdziale szóstym, literaturą oraz obserwacjami autora.

*Rozdział ósmy* stanowi podsumowanie zawierające omówienie pracy oraz wnioski końcowe.

## Rozdział 2

# Automaty komórkowe w modelowaniu

*W rozdziale tym przedstawiono najpopularniejszą metodę modelowania systemów złożonych – automaty komórkowe. W pierwszej części rozdziału przedstawiono klasyczne definicje automatów komórkowych. Następnie przytoczono znane z literatury klasyfikacje automatów komórkowych, oparte zarówno na analizie reguł, jak i na obserwacji własności przebiegu symulowanego procesu. Przedstawione informacje stanowią podstawę wskazania odmienności opracowanych przez autora definicji i metod modelowania zaprezentowanych w rozdziałach czwartym i piątym. Jedną z opisywanych w bieżącym rozdziale klasyfikacji jest podział na homogeniczne i niehomogeniczne automaty komórkowe. Ze względu na fakt, że modele dynamiki pieszych oparte na niehomogenicznych automatach komórkowych dobrze korespondują z systemami wieloagentowymi, końcową część rozdziału poświęcono właśnie opisowi systemów wieloagentowych.*

### 2.1 Automaty komórkowe

Pojęcie automatu komórkowego zostało zaproponowane przez amerykańskiego matematyka węgierskiego pochodzenia Johna von Neumanna w latach 40-tych XX-go wieku. Dużą rolę odegrał w procesie tworzenia podstaw automatów komórkowych polski matematyk Stanisław Ulam (ze słynnej lwowskiej szkoły matematyków). Ulam prowadząc prace badawcze dotyczące wzrastania kryształów, wprowadził w swoim modelu dyskretną przestrzeń oraz czas liczony w dyskretnych krokach. Później zasugerował von Neumannowi przyjęcie podobnych założeń w jego pracy badawczej. Von Neumann pracował z kolei nad projektem realizacji samo-replikującej się maszyny, czyli stwo-

rzeniem takiego modelu maszyny samosterującej, która powielalaby swoją budowę i przekazywałaby swoje cechy [vN66]. John von Neumann opracował pięć modeli samo-replikujących się automatów, jednak praktyczna realizacja tego projektu przerosła możliwości ówczesnej nauki i techniki. Badania te, chociaż nie doczekały się faktycznego ukończenia, doprowadziły jednak do powstania dziedziny wiedzy zwanej automatami komórkowymi, która zajmuje ważne miejsce w dzisiejszej nauce i technice.

Rucker w swojej książce *Seek!* [Ruc99] napisał trafnie, że każdy z dwóch wyżej wymienionych naukowców wniósł po jednej części do pojęcia *Cellular Automata* – automatów komórkowych. To znaczy od Ulama pochodzi część pojęcia *Cellular* – Komórkowy, natomiast od von Neumanna druga część *Automata* – Automaty.

Gra w życie jest bodaj najbardziej znanym automatem komórkowym. Automat ten został wymyślony w 1970 roku przez brytyjskiego matematyka Johna Conwaya. Opiera się on na dwuwymiarowej siatce, gdzie komórki mogą przybierać jeden ze zbioru stanów: {„żywy”, „martwy”}. Udział człowieka w tej grze sprowadza się do ustawienia stanów początkowych komórek danej siatki (czyli określenia początkowej konfiguracji siatki). Następnie układ ewaluuje automatycznie w kolejnych krokach czasowych według zasady, że stan danej komórki zależy tylko od liczby jej żywych sąsiadów. Zasadę tę można zapisać w postaci dwóch punktów:

- komórka w stanie „martwym” zmienia stan na „żywy” w kolejnym kroku czasowym jeśli ma dokładnie 3 sąsiadów w stanie „żywym” (w sąsiedztwie Moore’a o promieniu 1 – patrz 2.1.2),
- każda komórka w stanie „żywym” pozostaje w tym stanie w następnym kroku czasowym, jeśli w jej sąsiedztwie Moore’a o promieniu 1 znajdują się 2 albo 3 komórki w stanie „żywym”. Gdy liczba sąsiadów jest inna niż 2 lub 3, komórka zmienia stan na „martwy” w następnym kroku czasowym.

W ciągu kilkudziesięciu lat automaty komórkowe stały się jedną z chętniej wykorzystywanych metod symulacji dyskretniej w modelowaniu różnorodnych zjawisk. Odkryto w nich proste i skuteczne narzędzie modelowania różnorodnych zagadnień (np. [HPdP73], [CSST02], [SDRT04], [APL04], [MC06], [NS92]). Niektóre zastosowania automatów komórkowych wymieniono w sekcji 1.1.

### 2.1.1 Definicje pojęcia automatu komórkowego

Obecnie w literaturze możemy spotkać wiele definicji automatów komórkowych. Do najczęściej stosowanych należą definicje Ferbera (na podsta-

wie [Fer99]), Weimara (opisaną w [Wei98]) oraz definicję Fredkina (zgodnie z [CD98]).

1. **Definicja Ferbera.** *Automat komórkowy jest dyskretnym, dynamicznym systemem, którego zachowanie jest całkowicie określone w warunkach lokalnych relacji.*

2. **Definicja Weimara.** Automat komórkowy jest definiowany za pomocą czwórki parametrów <sup>1</sup>  $(L, S, N, f)$  gdzie:

- $L$  - siatka składająca się ze zbioru regularnych komórek (cel),
- $S$  - zbiór stanów komórki,
- $N$  - zbiór sąsiadów komórki,
- $f$  - funkcja przejścia.

Konfiguracja  $C_t: L \rightarrow S$  jest funkcją, która przypisuje każdej komórce na siatce pewien stan ze zbioru stanów. Funkcja przejścia  $f$  zmienia konfigurację  $C_t$  w następną konfigurację  $C_{t+1}$ . Równanie zmiany konfiguracji jest pokazane w wyrażeniu (2.1) wraz z równaniem uzupełniającym (2.2).

$$C_{t+1}(r) = f(\{C_t(i) | i \in N(r)\}) \quad (2.1)$$

gdzie:

- $N(r)$  - zbiór sąsiadów komórki  $r$
- $r$  - nr bieżący komórki
- $t$  -  $t = t + 1$  dyskretny krok czasowy
- $i$  - pojedyncza komórki

$$N(r) = \{i \in L | r - i \in N\} \quad (2.2)$$

Korzystając z powyższych oznaczeń i związków w tabeli 2.1 przedstawiono definicję automatu komórkowego wg Weimara.

Definicja	Opis
$L$	- siatka składa się z cel (komórek)
$t \rightarrow t + 1$	- system ewoluuje w dyskretnych krokach czasu
$S$	- zbiór wszystkich stanów komórki
$f : S^n \rightarrow S$	- definicja funkcji przejścia uwzględnia stan danej celi i stany cel sąsiednich
$N : \forall c \in N,$ $\forall r \in L : r + c \in L$	- relacja sąsiedzka jest lokalna i jednakowa

Tabela 2.1: Definicja automatów komórkowych wg Weimara

<sup>1</sup> zachowano oryginalne oznaczenia zmiennych zgodnie z [Wei98]

3. **Definicja Fredkina.** Podstawą definicji jest regularna siatka składająca się z komórek  $\vec{r}$  (w przypadku dwuwymiarowej, kwadratowej siatki  $\vec{r} = (i, j)$ , gdzie  $i, j$  są indeksami kolumn i wierszy komórek.) Stan każdej komórki w kroku czasowym  $t$  jest opisywany poprzez  $\Phi(\vec{r}, t)$  i może przyjmować wartości binarne 0, 1. Automat komórkowy można więc zdefiniować następująco: <sup>2</sup>

- regularna siatka komórek pokrywa określoną część d-wymiarowej przestrzeni
- zbiór zmiennych logicznych:

$$\Phi(\vec{r}, t) = \{\Phi_1(\vec{r}, t), \Phi_2(\vec{r}, t), \dots, \Phi_m(\vec{r}, t)\}$$

dołączony jest do każdej celi siatki  $\vec{r}$ , powoduje zmianę stanu każdej celi w czasie  $t = 0, 1, 2, \dots$

gdzie:

- $\Phi(\vec{r}, t)$  - zbiór stanów siatki
- $\vec{r}$  - wektor pozycji komórki na siatce
- $t$  -  $t = t + 1$  dyskretny krok czasowy
- $m$  - liczba dostępnych stanów komórki

- reguła  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ , określa ewolucję w czasie danego stanu  $\Phi(\vec{r}, t)$  w następujący sposób:

$$\Phi_j(\vec{r}, t+1) = \{R_j(\vec{r}, t), \Phi(\vec{r} + \vec{\delta}_1, t), \Phi(\vec{r} + \vec{\delta}_2, t), \dots, \Phi(\vec{r} + \vec{\delta}_q, t)\} \quad (2.3)$$

gdzie suma  $\vec{r} + \vec{\delta}_q$ , oznacza cele należące do sąsiedztwa celi  $\vec{r}$

Z powyższej definicji 2.3 wynika, że reguła  $R$  jest identyczna dla wszystkich komórek siatki i zmiana stanu komórki zależy tylko od stanu komórek należących do sąsiedztwa.

### 2.1.2 Klasyfikacja automatów komórkowych

Automaty komórkowe można klasyfikować wg różnorodnych kryteriów.

Według Kułakowskiego [Kuł00] klasyfikacja automatów komórkowych może być przeprowadzona na dwa sposoby:

- klasyfikacja na podstawie reguł
- klasyfikacja na podstawie obserwacji

---

<sup>2</sup> zachowano oryginalne oznaczenia zmiennych zgodnie z [CD98]

Poniżej przedstawiono najczęściej stosowane podziały automatów komórkowych.

W pierwszej kolejności przedstawiono klasyfikacje według reguł. Klasyfikacje te, ogólnie mówiąc, dotyczą struktury automatu komórkowego. Wyróżniają one następujące podziały:

- automaty komórkowe homogeniczne i niehomogeniczne,
- automaty komórkowe synchroniczne i asynchroniczne,
- podział ze względu na typy siatki,
- podział ze względu na definicje sąsiedztwa.

Warto powiedzieć, że klasyfikacja na podstawie reguł jest przeprowadzona z punktu widzenia konstruktora modelu.

W drugiej kolejności przedstawiono klasyfikację według obserwacji wprowadzoną przez Wolframa [Wol84]. Klasyfikacja ta oparta jest na śledzeniu zmian konfiguracji przestrzeni symulowanego procesu. Generalnie można stwierdzić, że klasyfikacja na podstawie obserwacji jest dokonywana z punktu widzenia użytkownika modelu (obserwatora modelowanego systemu).

### **Homogeniczne i niehomogeniczne automaty komórkowe**

Homogeniczny automat komórkowy jest określony zgodnie z klasycznymi definicjami opisanymi w sekcji 2.1.1. Klasyczny, homogeniczny automat komórkowy posiada więc następujące cechy:

- *jednakowy zbiór stanów dla każdej komórki siatki*
- *jednakowy zbiór reguł dla całej siatki.*
- *stałą siatkę automatu, tzn. obszar siatki nie może zmieniać się w czasie*
- *jednakowy schemat sąsiedztwa dla całej siatki*
- *na całej siatce obowiązuje jednakowa metoda aktualizacji stanów wszystkich komórek.*

Niespełnienie któregośkolwiek z podanych powyżej postulatów w modelu, oznacza przejście od klasycznych do niehomogenicznych automatów komórkowych.

Zdecydowana większość stosowanych dziś automatów komórkowych wykracza poza klasyczną definicję automatu komórkowego i należy do grupy



niehomogenicznych automatów komórkowych. W odróżnieniu od automatu homogenicznego, w niehomogenicznych automatach stosowane są różnorodne reguły przejścia dla poszczególnych komórek. Często stosowanym sposobem generowania lokalnych modyfikacji reguły przejścia jest dodawanie różnorodnych warstw do modelu np. na siatkę automatu nakładany jest graf, jak to ma miejsce w pracach [Top01] oraz [GSN04], lub warstwa pola dynamicznego [BKSZ01]. Efektem nałożenia dodatkowych warstw na siatkę automatu komórkowego są więc lokalne modyfikacje funkcji przejścia.

Formalny opis automatów komórkowych, zaproponowany przez autora, obejmujący zarówno automaty homogeniczne i niehomogeniczne, przedstawiono w sekcji 4.2. W kolejnych rozdziałach pracy opisano przykładowe zastosowania niehomogenicznych automatów komórkowych (patrz 4.3).

Pojęcie niehomogenicznego automatu komórkowego jest zbliżone do pojęcia systemu wieloagentowego. Niektórzy autorzy sugerują wręcz, że koncepcja niehomogenicznego automatu komórkowego jest jednoznaczna z koncepcją systemu wieloagentowego np. [Hec98]. Dlatego też zamieszczono w pracy (w sekcji 2.2) omówienie idei systemów wieloagentowych w kontekście niehomogenicznych automatów komórkowych.

### Synchroniczne i asynchroniczne automaty komórkowe

Klasyfikacja ta związana jest z aktualizacją pól automatu komórkowego, rozumianą jako aktualizacja stanów poszczególnych komórek.

W przypadku, gdy aktualizacja wszystkich pól siatki odbywa się jednocześnie, mówimy o *synchronicznym automacie komórkowym*. Natomiast w sytuacji, kiedy kolejność zmiany stanów poszczególnych komórek siatki (aktualizacja stanów komórek) nie następuje równocześnie, lecz w pewnej ustalonej kolejności, mówimy o *asynchronicznym automacie komórkowym* [CD98]. Shönfish i de Roos [SdR99] dzielą metody aktualizacji asynchronicznego automatu komórkowego na następujące dwie grupy:

- Automaty komórkowe asynchroniczne aktualizowane krokowo (*ang. step driven*), gdzie ustalony algorytm porządkuje kolejność aktualizacji komórek. Podczas jednego kroku czasowego może być aktualizowana co najmniej jedna komórka.
- Automaty komórkowe asynchroniczne aktualizowane czasowo (*ang. time driven*), gdzie aktualizacja poszczególnych komórek następuje w pewnej określonej chwili czasowej.

Łatwo zauważyć, że większość zjawisk zachodzących w przyrodzie ma charakter synchroniczny. Kierując się tym większość dotychczasowych modeli

opartych na automatach komórkowych zakładała synchroniczną aktualizację stanów siatki.

Natomiast na korzyść asynchronicznych automatów komórkowych przemawiają lepsze możliwości analizy danego zjawiska oraz możliwość bezpośredniego wpływu na aktualizację stanów komórek. Nie można zapomnieć, że możliwości implementacji w obecnie stosowanych architekturach komputerowych, przemawiają za asynchronicznym podejściem do symulacji. Bowiern postulat jednoczesnego przeglądania komórek i jednoczesnej aktualizacji stanów siatki jest w praktyce utrudniony lub wręcz niemożliwy we współczesnych architekturach komputerowych. W związku z powyższym automaty komórkowe z asynchroniczną aktualizacją siatki są bardzo dynamicznie rozwijającą się klasą modeli (np prace [Suz04], [Neh02], [CT04]).

### Podział ze względu na typy siatki w automacie komórkowym

W zależności od zastosowań stosuje się różne typy siatek w automatach komórkowych. Typ siatki automatu komórkowego zależy od następujących czynników:

- liczby wymiarów przestrzeni modelu (przestrzeń 1, 2, 3, ...,  $n$  wymiarowa)
- rodzajów elementarnych figur geometrycznych składających się na siatkę<sup>3</sup>

Do najbardziej znanych siatek dla różnych wymiarów przestrzeni należą:

- przestrzeń jednowymiarowa: siatka złożona z odcinków
- przestrzeń dwuwymiarowa: siatka kwadratowa, trójkątna, heksagonalna itd,
- przestrzeń trójwymiarowa: siatka złożona z czworościanów, sześciątów itd.

### Podział ze względu na sąsiedztwa

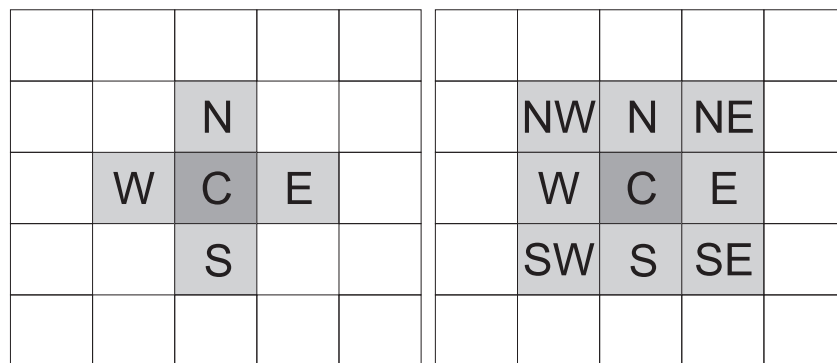
Klasyfikacja ze względu na sąsiedztwa jest ściśle związana z typem siatki zastosowanym w automacie komórkowym. Zdefiniowane sąsiedztwo danej komórki  $c_i$  określa skończoną liczbę komórek, których stany mają bezpośredni wpływ na stan tej komórki w danym kroku czasowym.

---

<sup>3</sup>w klasycznym CA siatka musi być zbudowana z jednakowych figur geometrycznych, w niehomogenicznych CA definiuje się czasem siatki nieregularne

Najbardziej popularną siatką automatu komórkowego jest siatka prostokątna. Poniżej przedstawione zostaną najczęściej stosowane sąsiedztwa zdefiniowane dla siatki prostokątnej tj. sąsiedztwo Moore’a oraz sąsiedztwo von Neumanna (rysunek 2.1).

Komórka środkowa oznaczona na rysunku jako  $c$  stanowi aktualnie rozpatrywaną, centralną komórkę. Komórki sąsiednie opisane odpowiednio symbolami  $N$ ,  $S$ ,  $E$ ,  $W$ ,  $SE$ ,  $SW$ ,  $NW$ ,  $NE$  (zgodnie z rysunkiem 2.1), są związane z położeniem sąsiednich komórek względem rozpatrywanej komórki  $c$ . Oznaczenia tychże komórek sąsiednich pochodzą od nazw kierunków geograficznych rozpatrywanych z punktu widzenia centralnej komórki  $c$ . Zgodnie z definicją sąsiedztwa Moore’a czy von Neumanna, komórka  $c$  *nie należy do swojego otoczenia*.



Rysunek 2.1: Po lewej sąsiedztwo von Neumanna komórki  $c$ , symbole:  $N$ ,  $S$ ,  $E$ ,  $W$  oznaczają kierunki geograficzne od komórki centralnej  $c$ , Po prawej sąsiedztwo Moore’a komórki  $c$ , symbole:  $N$ ,  $S$ ,  $E$ ,  $W$ ,  $SE$ ,  $SW$ ,  $NW$ ,  $NE$  oznaczają kierunki geograficzne od komórki centralnej  $c$ .

Szczegółową klasyfikację sąsiedztw dla poszczególnych typów siatek można znaleźć przykładowo w pracy [Tyl].

### Podział ze względu na klasy zachowań automatu komórkowego

Wolfram prowadząc obserwację dotyczącą dynamiki zmian w automatach komórkowych, biorąc pod uwagę końcowe stadia ich zachowań, wyróżnił następujące typy automatów komórkowych [Wol84]:

- I. Klasa I – Automaty prowadzące do jednorodnych konfiguracji sieci, w których stany wszystkich komórek siatki stają się jednakowe, niezależnie od początkowej konfiguracji.

- II. Klasa II – Automaty prowadzące do nie zmieniających się („zamrożonych”) lub periodycznie zmieniających się prostych konfiguracji.
- III. Klasa III – Automaty prowadzące do konfiguracji chaotycznych i nieokresowych.
- IV. Klasa IV – Automaty prowadzące do złożonych konfiguracji lokalnych.

Należy podkreślić, że klasyfikacja prowadzona na podstawie obserwacji wiąże się prawie zawsze z wątpliwością, czy zachowanie automatu było śledzone w wystarczająco długim czasie. W tym kontekście metody klasyfikacji oparte na podstawie reguł są jednoznaczne i pewne.

### 2.1.3 Charakterystyka automatów komórkowych

Automaty komórkowe są bardzo efektywnym narzędziem symulacyjnym. Poniżej wymieniono najważniejsze, zdaniem autora, zalety i wady automatów komórkowych.

Do zalet automatów komórkowych możemy wymienić ich następujące cechy:

- poprzez zastosowanie dyskretnego podziału czasu i przestrzeni uzyskuje się wysoką efektywność i dobre własności obliczeniowe modelu,
- bez dużego obciążania pamięci można symulować modele o rozległej przestrzeni,
- nie istnieją problemy z błędami numerycznymi czy artefaktami obliczeniowymi jak w przypadku modeli systemów dynamicznych opartych na równaniach różnicowych czy różniczkowych,
- istnieją duże możliwości w zakresie zrównoleglania procesu obliczeń,
- dzięki prostocie reguł działania, automaty komórkowe są relatywnie proste w implementacji,
- w przypadku zastosowania niehomogenicznych automatów komórkowych, traci się nieco na efektywności, lecz uzyskuje się możliwość uzyskania dużego realizmu w symulacji wielu zjawisk,

Poniżej wymieniono z kolei wady automatów komórkowych:

- w związku z zastosowaniem dyskretyzacji czasu i przestrzeni w modelu uzyskuje się znaczne uproszczenie modelowanej rzeczywistości,

- w klasycznym automacie komórkowym proste reguły i synchroniczna aktualizacja stanów komórek na siatce powodują dodatkowe uproszczenia w modelowanej rzeczywistości. Wada ta jest w dużej mierze niwelowana w przypadku zastosowania niehomogenicznych automatów komórkowych,
- proces budowania realistycznego i przy tym efektywnego modelu przy użyciu niehomogenicznych automatów komórkowych jest dosyć żmudny i długotrwały. Proces ten wymaga wielu zabiegów weryfikujących m.in.: konieczność dokładnego sformułowania i doprecyzowania reguł do opisu poszczególnych modeli, walidacje reguł, konieczność optymalizacji kodu programu symulacyjnego pod kątem efektywności algorytmów itd.

## 2.2 Systemy wieloagentowe

Systemy wieloagentowe (*ang. Multiagent Systems, MAS*) należą do tzw. rozproszonej sztucznej inteligencji (*ang. Distributed Artificial Intelligence, DAI*) [BG88]. Podstawową jednostką systemu MAS jest *autonomiczny agent*.

*Autonomiczny agent jest aktywnym elementem systemu, zdolnym do spowodowania tego, że system może być zmieniany w kierunku korzystnym dla agenta. Zawiera on całą niezbędną do działania informację o swoim stanie, natomiast inicjatywę do działania podejmuje samodzielnie, w oparciu o obserwację środowiska zewnętrznego*<sup>4</sup>.

Inna definicja agenta mówi, że *autonomiczny agent to jednostka, działająca w pewnym środowisku, zdolna do komunikowania się oraz monitorowania swego otoczenia i podejmowania autonomicznych decyzji, aby osiągnąć cele określone podczas jej projektowania lub działania*<sup>5</sup>.

Poniżej wymieniono najważniejsze cechy autonomicznego agenta (za [Cet99]):

1. Autonomiczny agent pozyskuje informacje z otaczającego go środowiska. Obecność innych agentów oraz ich zachowanie wpływa na obraz środowiska zaobserwowany przez agenta,
2. Stan środowiska ma wpływ na zachowanie się agenta, czyli podejmowane przez niego działania,
3. Autonomiczny agent posiada pamięć i przy podejmowaniu decyzji może uwzględnić zapamiętane zdarzenia i stany środowiska,
4. Autonomiczny agent może zmieniać stan środowiska,

---

<sup>4</sup>definicja za [Cet99]

<sup>5</sup>definicja za [Wik]

5. Przepływające informacje w systemie wieloagentowym można sklasyfikować w dwóch kategoriach:
  - przepływ agent – agent,<sup>6</sup>
  - przepływ agent – środowisko, czyli dwustronny proces przepływu informacji.<sup>7</sup>
6. Stworzony przez danego agenta inny agent może być jego dokładną kopią, albo może różnić się od niego pewnym zestawem cech,
7. Autonomiczny agent jest tworzony przez innego autonomicznego agenta,
8. Autonomiczny agent może zakończyć działalność sam, bądź z inicjatywy innego agenta.

Natomiast wg [Wik] funkcjonalność agenta można określić za pomocą następujących cech: autonomiczności (rozumianej jako zdolność podejmowania samodzielnych decyzji), komunikatywności (rozumianej jako umiejętność komunikacji z innymi agentami i użytkownikiem), percepcji (jest to zdolność do postrzegania i reagowania na zmiany środowiska), mobilności (zdolność do poruszania się i gromadzenia informacji o środowisku).

Systemy wieloagentowe służą m.in. do tworzenia systemów informatycznych. W szczególności technologie wieloagentowe wpływają pozytywnie na następujące własności systemów [Cet99]:

1. Podniesienie elastyczności systemu rozumianej jako zdolność do adaptowania systemu do wykonywania nowych zadań.
2. Poprawienie niezawodności systemów.
3. Podniesienie wydajności systemów.
4. Rozbudowa systemu o nowe funkcjonalności np.: samoorganizację, samoadaptację.

Oczywiście obszar zastosowania systemów wieloagentowych jest bardzo szeroki. Należą tu między innymi: wyszukiwanie informacji w sieci, zarządzanie sieciami telekomunikacyjnymi, symulacja rynku, wspomaganie zarządzania w przedsiębiorstwie czy kontrola ruchu lotniczego itd.[Wik].

---

<sup>6</sup>wśród pieszych przykładem takiego przepływu informacji może być wzajemne naśladowanie zachowań agentów

<sup>7</sup>przy podejmowaniu decyzji przez pieszych następuje akwizycja informacji ze środowiska

Należy podkreślić, że systemy wieloagentowe nadają się dobrze, szczególnie w połączeniu z automatami komórkowymi, do symulacji zachowania dużych grup ludzi [DJT01, DJT00, Sig04], zarówno w sytuacji normalnego ruchu, jak i sytuacjach awaryjnych. Przykładowa koncepcja oparta na wielowarstwowej strukturze siatki, w zależności od symulowanej sytuacji w systemie wieloagentowym została przedstawiona w pracy [BMV05]. Inne przykłady połączenia koncepcji automatów komórkowych z systemami wieloagentowymi omówiono w sekcji 3.4.2.

W zasadzie koncepcja rozszerzonego automatu komórkowego  $ECAL_{const}$  (rozdział 4.3) może być rozumiana jako połączenie idei automatów komórkowych z systemem wieloagentowym, szczególnie dla przypadku modelowania dynamiki pieszych.

## Rozdział 3

# Modelowanie dynamiki pieszych

*W rozdziale tym przedstawiono przegląd literatury związanej z zagadnieniami modelowania dynamiki pieszych, a także omówiono stosowane obecnie w świecie metodologie komputerowej symulacji dynamiki pieszych. W pierwszej części rozdziału opisano niektóre reguły ruchu ludzi w sytuacjach normalnych i ewakuacyjnych, a następnie przedstawiono charakterystyczne zjawiska w ruchu pieszych. Dalsze części rozdziału obejmują analizę związaną ze sterowaniem przepływem tłumu ludzi poprzez zastosowanie odpowiednich rozwiązań architektonicznych. Następnie uwagę poświęcono ciągłym i dyskretnym metodom modelowania przepływu ludzi. Opisano najpopularniejsze obecnie metody: ciągłą metodę sił społecznych oraz dyskretną metodę automatów komórkowych. W następnej części rozdziału omówiono wybrane prace związane z modelowaniem dynamiki tłumu za pomocą automatów komórkowych. Na końcu rozdziału rozpatrzono problematykę użycia klasycznej formuły automatu komórkowego w badaniu dynamiki pieszych*

### 3.1 Wprowadzenie

Obecnie obserwuje się duże zainteresowanie algorytmami i narzędziami opisującymi dynamikę pieszych. Wiedza ta jest szczególnie przydatna przy projektowaniu obiektów użyteczności publicznej takich jak: teatry, kina, stadiony, dworce, centra handlowe czy kościoły. Projektanci obiektów użyteczności publicznej już od czasów starożytnych po dzień dzisiejszy stosują różnego rodzaju rozwiązania architektoniczne modelujące przepływ ludzi. Obecnie prowadzone są projekty badawcze o bardzo wysokich nakładach finansowych, mające na celu skuteczną i realistyczną symulację dynamiki pieszych. Wśród tych projektów można wymienić choćby wspomniane we wstępie międzynarodowe projekty *AlpSim* [SNL<sup>+</sup>04] oraz *SimWalk* [sim], niemiecki projekt



*BYPASS* [tra] czy brytyjski *EXODUS* [exo].

Proces projektowania obiektów użyteczności publicznej wymaga uwzględnienia zarówno warunków codziennego ich użytkowania, a także sytuacji awaryjnych (ewakuacyjnych). Wiedza o różnych rozwiązaniach architektonicznych regulujących bezpieczny przepływ dużych grup ludzi, w połączeniu z możliwościami jakie dały technologie informatyczne w ciągu ostatnich kilku dekad, daje znakomite możliwości w zakresie modelowania i projektowania dynamiki tłumu. Potwierdzeniem tej tezy są różnorodne modele i narzędzia symulacyjne opisujące dynamikę tłumu pieszych. Znajdują one zainteresowanie w świecie nauki i praktyczne zastosowanie przy wspomaganiu projektowania obiektów użyteczności publicznej.

Dynamika tłumu jest przedmiotem naukowych badań już od wielu lat. Współczesne wymagania stawiane inżynierom zachęcają do sięgnięcia przez nich również do literatury będącej klasyką takich dziedzin jak socjologia czy psychologia. Wśród prac które zajmują się między innymi dynamiką tłumu można wymienić następujące pozycje: [LB95], [Fre24], [Zip49], [HW58], [Old68], [Pau82].

Pomimo nieregularności, które niesie za sobą zachowanie pojedynczego pieszego, możemy obserwować pewne zasady, którymi kierują się piesi. Większość autorów jest zgodna, że zazwyczaj zasady zachowania pieszych i ich dynamiki można wyjaśnić w sposób racjonalny np [Sim90] czy [HM96]. Niektóre zasady mogą występować w zarówno w sytuacjach normalnych jak i ewakuacyjnych (w szczególności związana z paniką), inne zaś są ściśle związane z określoną sytuacją. Zmienia się styl życia ludzi oraz wciąż odkrywane są nowe zasady dynamiki pieszych, co zostało opisane m.in. w pracach [HFV00], [HFMV02].

Poniżej przedstawiono zatem kilka zasad, opisanych w literaturze, odnoszących się zarówno do sytuacji normalnych jak i ewakuacyjnych.

**Reguły ruchu ludzi w sytuacjach normalnych.** Jedną z podstawowych zasad w normalnych warunkach jest fakt, że pieszy w tłumie szuka zazwyczaj *jak najszybszej drogi, zaś nie jak najkrótszej* [Gan98], [HFMV02].

Podobnie pieszy przemieszcza się z własną prędkością, która jest dla niego komfortowa. Prędkość ta jest zależna od wieku, płci, otoczenia, pory dnia [HFMV02] i, według badań Hendersona, przeciętnie wynosi  $1,34 \frac{m}{s}$ , gdzie odchylenie standardowe wynosi  $0,26 \frac{m}{s}$  [Hen71].

Pieszy utrzymuje pewien dystans od innych pieszych i przeszkód. Dystans ten jest tym większy im większa jest prędkość poruszania się oraz im mniejsze jest zagęszczenie tłumu.

**Reguły ruchu ludzi w sytuacjach ewakuacyjnych.** Diametralna zmiana zachowania następuje w przypadku sytuacji ewakuacyjnej. Piesi poruszają się zdecydowanie szybciej niż normalnie. Jeżeli nie dochodzi do gwałtownego współzawodnictwa możemy mówić o kontrolowanej ewakuacji.

Niestety w sytuacjach ewakuacyjnych podstawowym zagrożeniem jest wybuch paniki. Na skutek istniejących lub wyimaginowanych czynników zewnętrznych piesi zaczynają gwałtownie rywalizować ze sobą, chcąc jak najszybciej opuścić zagrożone miejsce. Powoduje to zdecydowane zmniejszenie sprawności ewakuacji oraz jest powodem wytworzenia się ciśnienia, nawet powyżej 4500 N/m [ES93]. Jest to niezwykle niebezpieczne dla zdrowia i życia pieszych.

Podobnie obserwuje się zjawisko "owczego pędu" i naśladowania sąsiadów, przez to często wszystkie dostępne wyjścia czy drogi awaryjne pozostają niewykorzystane [Kea82].

## 3.2 Charakterystyczne zjawiska w ruchu pieszych

W podrozdziale tym opisano pewne charakterystyczne zjawiska towarzyszące ruchowi pieszych. Niektóre z nich występują wyłącznie w sytuacjach normalnych, inne zaś w ewakuacyjnych, natomiast największa grupa zjawisk dotyczy zarówno jednych, jak i drugich sytuacji.

**Efekt wąskiego gardła.** Efekt wąskiego gardła (*ang. bottlenecks effect*) zachodzi w sytuacji, gdy zmniejsza się dostępna powierzchnia ruchu w kierunku w którym zmierzają piesi [HFMV02]. Wąskie gardło występuje przykładowo w zwężeniu korytarza, wyjściu z pomieszczenia itd. Jest to miejsce szczególnie predestynowane do generowania się zatorów. Przy większej liczbie i zagęszczeniu osób powoduje automatyczne zmniejszenie prędkości ruchu. W wąskim gardle występuje ryzyko blokady, szczególnie w przypadku sytuacji ewakuacyjnych.

**Oscylacje.** Oscylacje (*ang. oscillations*) są zjawiskiem zachodzącym w sytuacji, gdy na drodze pieszych pojawiają się wąskie gardła. Kiedy tłum osób zbliża się do przeszkody z różnych stron, zaobserwować można wzajemne przepuszczanie się pieszych, co w spojrzeniu z lotu ptaka przedstawia się właśnie jako oscylacje. Z punktu widzenia sprawności pokonania wąskiego gardła jest to zjawisko bardzo korzystne, umożliwiające płynny ruch. Oscylacje są, obok zjawiska tworzenia się strug opisanego w podrozdziale 3.2, do-

wodem na samoorganizację pieszych występującą w normalnych, codziennych warunkach, czy też przy kontrolowanej ewakuacji. W sytuacji paniki tłumu oscylacje zanikają, ponieważ większość pieszych, chce jak najszybciej opuścić pomieszczenie, nie zważając na innych. Efekt ten jest nazywany *Frozen by heating* i dla ruchu pieszych został dokładnie opisany w pracach [Mul99] oraz [HMFV01]

**Tworzenie się strug.** W dwu- lub wielokierunkowym ruchu pieszych możemy zaobserwować tworzenie się strug (*ang. lane*). Piesi, aby zniwelować opory ruchu idą za poprzednikami, którzy zmierzają w tym samym kierunku (oczywiście z tym samym zwrotem). Obserwując korytarz, chodnik, czy nawet przejście dla pieszych, z perspektywy lotu ptaka, możemy zaobserwować strugi osób poruszających się w tych samych kierunkach. Zjawisko strugi pokazano na fotografii 3.1. Liczba strug zależy m.in. od szerokości przejścia i gęstości tłumu. Występowanie strug traktuje się również jako przejaw samoorganizacji pieszych. Efekt strugi został po raz pierwszy wskazany w pracy [Yam01]



Rysunek 3.1: Fotografia przedstawia grupę pieszych na przejściu na pieszych. Strzałki wskazują strugi, które są widoczne pomimo niewielkiej liczby pieszych. (Fot. autor)

### 3.3 Rozwiązania architektoniczne w obiektach użyteczności publicznej

Architekci począwszy od czasów starożytnych poszukują rozwiązań, które mogą zagwarantować bezpieczeństwo i wygodę ludziom korzystającym z obiektów użyteczności publicznej.

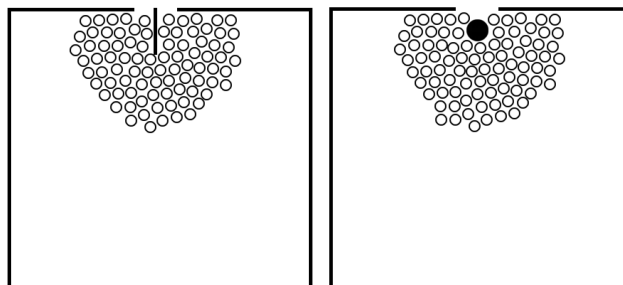
Do powszechnie znanych i stosowanych zasad projektowania bezpiecznych obiektów należą m.in.:

- określenie maksymalnej liczby osób mogących korzystać bezpiecznie z danego obiektu,
- zaprojektowanie ciągów komunikacyjnych o parametrach dostosowanych do ich przepustowości,
- zaprojektowanie wystarczającej liczby i odpowiedniej szerokości wyjść awaryjnych z obiektu. Ma to na celu zapobiegnięcie efektowi wąskiego gardła (patrz 3.2),
- zaprojektowanie i odpowiednie oznakowanie dróg ewakuacyjnych,
- zastosowanie schodów o dopuszczalnym kącie nachylenia (stromości). Ma to kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa i przepustowości [GMB99],
- takie usytuowanie drzwi wyjściowych, aby było otwierane na zewnątrz pomieszczeń, aby umożliwić ich otwarcie w przypadku ewakuacji i naporu ludzi.

Wymienione powyżej zasady należą do sprawdzonych, powszechnie stosowanych metod, wspomagających bezpieczne projektowanie obiektów użyteczności publicznej. Istnieją też inne, nieco mniej znane, metody poprawy bezpieczeństwa i komfortu pieszych, które zostały przedstawione poniżej.

**Zastosowanie kolumny lub barierki.** Rozpatrzmy zatem sytuację w której grupa ludzi opuszcza pomieszczenie. Analizując zarówno przypadek normalnego opuszczania pomieszczenia jak i przypadek ewakuacji łatwo zauważyć, że największy ścisk będzie panował bezpośrednio przed samym wyjściem. Tego typu sytuację określa się efektem wąskiego gardła (efekt opisany w sekcji 3.2). W sytuacji nagłej i niekontrolowanej ewakuacji ciśnienie, jakie wytwarzają napierający w kierunku wyjścia piesi, może znacznie spowolnić proces opuszczania pomieszczenia, bądź spowodować zupełną blokadę wyjścia. Dlatego przed wyjściem można zastosować prostopadle ustawioną poręcz (rys. 3.2 po lewej ) lub centralnie ustawioną kolumnę (rys. 3.2 po prawej ),

które przeciwdziałają zablokowaniu drzwi, poprzez przeciwstawiające się siły generowane przez pieszych napierających z różnych kierunków.

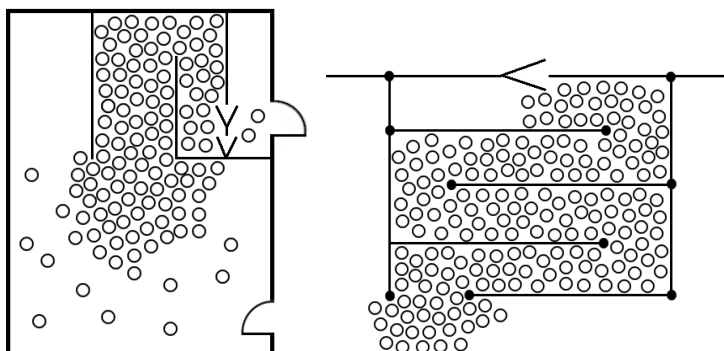


Rysunek 3.2: Po lewej – zastosowanie barierki przy wyjściu zapobiega zablokowaniu się wyjścia przez napierających pieszych.

Po prawej – ustawienie kolumny przy wyjściu jako kolejny przykład zapobiegania blokowania wyjścia przez pieszych

**Zestaw barier regulujących przepływ.** Bardzo skuteczną metodą do regulacji przepływu ludzi jest zastosowanie barier. Ich budowę, wielkość i rozmieszczenie należy dobrać w zależności od natężenia ruchu pieszych budowy pomieszczenia.

Przykładem ciekawych rozwiązań może być plan pomieszczenia dla narciarzy w kolejce linowej Nordpark Hungerburg w Innsbrucku.



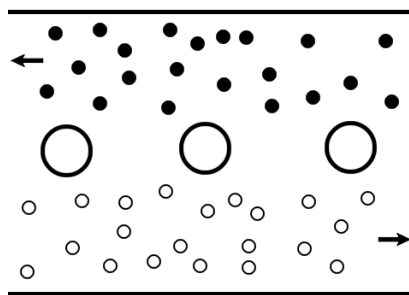
Rysunek 3.3: Po lewej – użycie barierki zapobiega wyłamaniu bramek przez napierający tłum narciarzy – stacja kolejki górskiej Innsbruck Hungerburg. Po prawej – uporządkowanie przepływu tłumu pieszych oczekujących na wejście do muzeum

Kolejka kursuje co ok. 20 min. i narciarze zgromadzeni w poczekalni napierają w stronę obrotowych bramek. Aby zapobiec wyłamaniu tychże bramek i potencjalnemu chaosowi, tak ukształtowano przepływ, aby siły działające w układzie odpowiednio rozkładały się (rys. 3.3 po lewej).

Innym przykładem może być zestaw barierek ustawionych np. przed wejściem do muzeum (rys. 3.3 po prawej). Jeżeli przepływ ludzi nie jest zbyt duży, jest to bardzo skuteczne rozwiązanie uniemożliwiające generowanie się bardzo dużych sił naporu.

Kolejny przykład to zastosowanie zastawu metalowych barierek na dworcach autobusowych, które regulują ruch pasażerów przy wsiadaniu do autobusu.

**Zastosowanie kolumn w ruchu dwukierunkowym.** Ciekawe rozwiązanie regulacji ruchu dwukierunkowego o dużym natężeniu uzyskuje się poprzez użycie kolumn na środku korytarza wzdłuż kierunku ruchu [HFMV02]. Kolumny powodują, że ludzie zdążający w danym kierunku, intuicyjnie wybierają prawą stronę korytarza (patrząc ze swej perspektywy). Skutkuje to wywołaniem dwóch strug (patrz sekcja 3.2) i znacznie poprawia przepustowość oraz komfort korzystania z korytarza przez pieszych. Rozwiązanie takie zastosowano m.in. w korytarzach metra w Budapeszcie (rys 3.4). Odległość między kolejnymi kolumnami wynosi tam kilka metrów. Oczywiście, aby to rozwiązanie spełniało swoją funkcję, korytarz musi być odpowiednio szeroki.



Rysunek 3.4: Uporządkowanie dwukierunkowego ruchu pieszych poprzez zastosowanie kolumn

### 3.4 Przegląd modeli dynamiki pieszych

W literaturze spotyka się modelowanie dynamiki pieszych zarówno przy zastosowaniu układów ciągłych jak choćby w pracach [HM95, HFV00, HFMV02] czy [HB00] oraz układów dyskretnych: przykładowo prace [BA99, BA00] czy [FI99, DJT01, DJT00] itd. Z punktu widzenia klasyfikacji kluczową rolę przy wyznaczaniu trajektorii ruchu pieszego w symulacji odgrywa przyjęcie przyrostu czasu. Jeżeli rozpatrywane przyrosty czasu rozpatrujemy jako nieskończenie małe (patrz równanie 3.1), wówczas rozważany układ jest układem ciągłym.

$$t_{k+1} = t_k + dt \quad (3.1)$$

gdzie:

- $k$  - indeks kroku symulacji,
- $t_k$  - czas w  $k$ -tym kroku symulacji,
- $dt$  - nieskończenie mały przyrost czasu.

Natomiast w sytuacji, gdy czas mierzymy jako pewne skończone przyrosty, rozważany układ jest układem dyskretnym.

$$t_{k+1} = t_k + \Delta t \quad (3.2)$$

gdzie:

- $k$  - indeks kroku symulacji
- $t_k$  - czas w  $k$ -tym kroku symulacji,
- $\Delta t$  - skończony przyrost czasu.

Ze względu na reprezentację przestrzeni modele możemy podzielić na ciągłe oraz dyskretne. Do zalet ciągłej reprezentacji przestrzeni zaliczyć możemy większe podobieństwo do rzeczywistości, natomiast za dyskretną reprezentacją przestrzeni przemawia prostota i dużo mniejsza złożoność obliczeniowa stosowanego algorytmu. Z kolei rozpatrując skalę modelu możemy dostrzec fakt, że zdecydowana większość prezentowanych w literaturze modeli, to modele mikroskopowe, które rozpatrują całość złożonego układu z punktu widzenia poszczególnych osób. Natomiast modele makroskopowe rozpatrują przepływ ludzi kompleksowo, na podobieństwo dynamiki płynu w hydrodynamice. Najbardziej znanym model makroskopowym dynamiki pieszych jest model zaprezentowany w pracy [Pau95].

W obrębie modeli ciągłych i dyskretnych wyróżnia się modele wykorzystujące podejście deterministyczne lub probabilistyczne (stochastyczne), mikroskopowe czy makroskopowe itd. Szczegółowe kryteria modelowania opisuje np. Gershenfeld w [Ger99].

### 3.4.1 Modele ciągłe względem czasu

Z fizycznego punktu widzenia układ z poruszającymi się pieszymi może być interpretowany jako układ  $n$  poruszających się cząstek, w którym zachodzi dyssypacja. Można go opisać w postaci deterministycznego modelu Dynamiki Molekularnej (*ang. Molecular Dynamics, MD*) po uwzględnieniu pewnych zastrzeżeń. Równania ruchu są tutaj oparte na klasycznej mechanice Newtona, z zastrzeżeniem, że nie zachodzi w pełni trzecia zasada dynamiki, czyli akcja nie koniecznie równa się reakcji (patrz [BKSZ01]). Obecnie chyba najpopularniejszym modelem ciągłym pod względem czasu i przestrzeni jest model sił społecznych (*ang. Social Forces*) SF opracowany przez Helbinga i Molnara w 1995 [HM95]. Model ten jest dwuwymiarowy, a ludzie są reprezentowani jako koła o określonym promieniu. Równanie ruchu jest tu opisywane następująco:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = v_i(t) \quad (3.3)$$

gdzie:

- $dx_i$  - nieskończenie mała zmiana położenia  $i$ -tego pieszego,
- $i$  - indeks pieszego,
- $v$  - chwilowa prędkość pieszego,
- $dt$  - nieskończenie mały przyrost czasu.

Natomiast równanie przyspieszenia jest opisywane następująco:

$$m_i \frac{dv_i(t)}{dt} = f_i(t) + \xi_i(t) \quad (3.4)$$

gdzie:

- $m_i$  - masa  $i$ -tego pieszego,
- $dv_i(t)$  - nieskończenie mała zmiana prędkości  $i$ -tego pieszego,
- $f_i(t)$  - suma sił działających na  $i$ -tego pieszego w chwili  $t$ ,
- $\xi_i(t)$  - fluktuacje odzwierciedlające nieregularne zachowania.

W skład wektora sił wchodzi tu następujące siły:

- wewnętrzna siła poruszania się w określonym kierunku,



- siły interakcji między pieszymi,
- "społeczne siły odpychania",
- siły unikania ścian układu,
- siły przyciągania do zdefiniowanych punktów.

Wektory sił różnią się w zależności od rozpatrywanego przypadku: czy rozpatrywana symulacja dotyczy zwyczajnej czy też ewakuacyjnej sytuacji. Aby rozwiązać układ równań deterministycznie określamy siły  $f(t)$  oraz  $x(t)$  i numerycznie rozwiązujemy układ różniczkowych równań cząstkowych. Szczegóły opisu metody sił społecznych można znaleźć w pracach [HM95], [HFV00].

Na bazie tej pracy powstało wiele interesujących prac. Przykładowo Kirkland i Maciejewski wprowadzili do układu autonomiczne roboty, które regulując przepływ poprawiają charakterystyki całego układu (patrz [KM03]).

### 3.4.2 Modele dyskretne względem czasu

Zdecydowana większość spotykanych w literaturze dyskretnych modeli dynamiki pieszych bazuje na metodzie automatów komórkowych. Uwzględniając zastosowanie powiązane z antropologią początkowo zastosowano CA do badania ruchu drogowego i w latach 90-tych powstał model *NaSch* opisujący ruch samochodów zaprezentowany w pracy [NS92]. Kilka lat później powstały prace dotyczące bezpośrednio dynamiki pieszych.

#### Zastosowania CA w dynamice pieszych

Pierwsze modele proponujące zastosowanie automatów komórkowych w dynamice pieszych zostały opisane w wydanych w 1999 pracach: [FI99], w której rozważono problemy samoorganizacji w ruchu pieszych, pracy [MIN99] w której zanalizowano problemy tworzenia się zatorów w ruchu pieszych, a także pracy [BA99], w której autorzy zaproponowali dwukierunkowy model ruchu z uwzględnieniem zjawiska strugi. Z kolei rozwinięcie modelu do ruchu wielokierunkowego można znaleźć w pracy [BA00].

Ciekawą koncepcję zaprezentowano w pracy [BKSZ01], w której zaproponowano dwuwymiarowy model ruchu pieszych zawierający podwójną siatkę: statyczną i dynamiczną. Pierwsza z wymienionych siatek tzw. siatka statyczna jest niezmiennym w czasie polem skalarnym, reprezentującym odległości od wyjścia. Natomiast druga siatka tzw. siatka dynamiczna zmienia się w czasie i zależy od frekwencji pieszych w danym miejscu wskazując na szczególnie uczęszczane pola podczas ruchu pieszych.

Z kolei interesującym pomysłem jest połączenie koncepcji automatów komórkowych z ideą systemów wieloagentowych przedstawione w pracach [DJT01] oraz [DJT00]. Piesi są tu reprezentowani przez agentów. Agenci w modelu podejmują działania w oparciu o obserwacje środowiska i innych agentów, a także sami mają możliwość oddziaływania. Ten model znalazł zastosowanie w symulacji swobodnego ruchu pieszych, a w szczególności opisu dynamiki pieszych w centrach handlowych i na ulicach miast.

W pracach [KMKWS00, KMKS01] oraz [Klü03] zaprezentowano model oparty na automatach komórkowych, służący do symulacji ewakuacji statków pasażerskich. Na rzut pomieszczeń statku nałożono warstwę w postaci siatki z polem potencjalnym [BCN97]. Zgodnie z założeniami piesi poruszają się kierując się wartościami potencjału. Za pomocą systemu reguł, autorzy stworzyli realistyczne i efektywne narzędzie ewakuacji ludzi ze statków pasażerskich.

Problemu ewakuacji statków pasażerskich poruszają również prace D. Łozowickiej [Loz05], [Loz02]. Autorka zaproponowała w nich zastosowanie algorytmów genetycznych do wyznaczenia najmniej korzystnych początkowych parametrów ewakuacji ludzi ze statku. Do parametrów tych należą: początkowe rozmieszczenie pasażerów, wybór kierunku i drogi ewakuacji oraz dostępność dróg ewakuacyjnych. W pracy [Loz05] sieć dróg ewakuacyjnych oraz wymienionych wyżej parametrów wejściowych została zakodowana w postaci chromosomów. Utylitarnym celem pracy było dostarczenie projektantom statków narzędzia, które umożliwi zbadanie procesów ewakuacji statku i tworzenie bezpiecznych rozwiązań projektowych.

W japońskiej pracy [NSM04] przedstawiono dwukierunkowy ruch pieszych w pewnej ograniczonej przestrzeni na przykładzie fragmentu korytarza. Autorzy uznali za najważniejszą cechę dwukierunkowego ruchu pieszych wzajemne unikanie kolizji. Wyszli oni z założenia, że każdy pieszy od swoich najmłodszych lat uczy się jak unikać kolizji. Na tej podstawie został zaproponowany model, w którym piesi uczą się unikania kolizji w ruchu dwukierunkowym. Działanie modelu jest dwuetapowe: w pierwszej części, przez pierwszych kilkadziesiąt przebiegów symulacji realizowany jest etap nauki. Odbyna się on przez odpowiednio wcześnie wykrycie i zapamiętanie konfiguracji pieszych, które prowadzą do kolizji. W drugim etapie piesi z odpowiednim wyprzedzeniem reagują na pojawienie się „niebezpiecznych” konfiguracji, prowadzących do kolizji i odpowiednio szybko zmieniają swoje położenie, tym samym nie dopuszczając do powstawania zderzeń czy zakleszczeń.

Ciekawe porównanie dotyczące zastosowania ciągłej metody *Social Forces* (SF) oraz automatów komórkowych przeprowadzono w pracy [SW04]. Model niehomogenicznego automatu komórkowego stworzono na podstawie znanego z fizyki automatu FHP o regularnej sześciokątnej siatce [FHP86],

natomiast model ciągły oparto na metodzie oddziałujących cząstek z zastosowaniem metody SF Helbinga [HM95, HMFV01]. Ponadto uzyskane w symulacji komputerowej rezultaty porównywano z brytyjskimi rzeczywistymi eksperymentami. W wyniku walidacji autorzy stwierdzili porównywalny stopień realizmu metod: CA i SF (choć w poszczególnych aspektach zachodziły różnice na korzyść jednej lub drugiej metody). Autorzy zaobserwowali dużą różnicę w efektywności metod, zależną od liczby symulowanych pieszych. Dla 200 osób symulacja SF wykonywała się przez 120 s, zaś symulacja CA przez 1,7 s. Natomiast dla 1000 osób symulacja SF wykonywała się 189 s, zaś symulacja CA 1,8 s. Pomimo zastosowanej w metodzie SF optymalizacji w postaci algorytmu Hockneya (określającego maksymalny promień oddziaływań między pieszymi) czasy wykonania symulacji różniły się kilkadziesiąt razy na korzyść automatu komórkowego.

W artykułach autorstwa J. Wąsa, B. Gudowskiego i P.J. Matuszyka [WGM06b, WGM06a] przedstawiono model informatyczny dynamiki pieszych zbudowany na bazie socjologicznej teorii Edwarda Halla [Hal59], [Hal66], [Ari96], [Gei91] o zachowaniu różnych stref wokół ludzi. Gałąź nauki rozpatrująca alokację ludzi w danym środowisku przy określonych warunkach jest określana proksemiką (*ang. proxemics*). W modelu tym przestrzeń jest reprezentowana jako jednorodna siatka zbudowana z kwadratów, a ludzie reprezentowani są poprzez elipsy. Przy czym środek elipsy pokrywa się ze środkiem celi. Każdy pieszy ma możliwość wykonywania ruchów zarówno o charakterze postępowym i obrotowym. Osoby w modelu oddziałują wzajemnie na siebie poprzez siły (*ang. Social Distances Forces*), których genezą są strefy społeczne: intymna, prywatna, społeczna i publiczna. Jako przykład działania modelu został zaimplementowany ruch pieszych (pasażerów) w tramwaju.

Natomiast w pracy [GSN04] przedstawiono kompleksową symulację ruchu turystycznego w Szwajcarskich Alpach. Symulacja ta bazuje na połączeniu technologii automatów komórkowych z systemem multiagentowym. W pracy wykorzystano koncepcję pola potencjałów przyciągającego pieszych (np. wewnętrzna strona zakrętów). Z kolei, aby poszukiwać najkrótszej drogi w badanej przestrzeni, nałożono nań graf, w celu poszukiwania najkrótszej drogi w reprezentującym przestrzeń grafie za pomocą algorytmu Dijkstry [Dij57].

## Rozdział 4

# Proponowana definicja automatu komórkowego

*W rozdziale tym przedstawiono zaproponowaną przez autora, nową definicję automatu komórkowego  $CAL_{const}$ . Definicja ta umożliwia opisanie modeli opartych na klasycznych automatach komórkowych, a równocześnie reprezentuje pewną klasę automatów niehomogenicznych. Definicja  $CAL_{const}$  stanowi także bazę dla zdefiniowania dowolnych klas automatów niehomogenicznych, nazwanych przez autora rozszerzonymi automatami komórkowymi  $ECAL_{const}$ . Na początku rozdziału zaprezentowano przesłanki, które skłoniły autora do stworzenia nowej definicji klasycznego automatu komórkowego. Następnie przedstawiono nową definicję automatu komórkowego, nazwanego automatem ze stałą siatką  $CAL_{const}$ . W końcowej części rozdziału zaproponowano formalny opis rozszerzonego modelu automatu komórkowego  $ECAL_{const}$ .*

### 4.1 Przesłanki do stworzenia nowego modelu $CAL_{const}$ i jego formalizacji

Jak to już zostało powiedziane we wstępie niniejszej pracy, większość modeli opartych na automatach komórkowych, w szczególności dotyczących dynamiki ruchu pieszych wykracza poza spotykane w literaturze definicje automatów komórkowych (wybrane, ważniejsze definicje zostały przytoczone w sekcji 2.1.1 niniejszej pracy). Klasyczne definicje automatów komórkowych tzw. automatów homogenicznych zakładają w szczególności:

- jednorodność modelu polegającą na jednakowej definicji sąsiedztw dla wszystkich komórek

- jednakowe dla każdej komórki odwzorowanie lokalne przyporządkowujące jej następny stan w zależności od stanu sąsiedztwa
- jednakowy zbiór stanów dla każdej komórki
- stałą w czasie siatkę automatu

Cechy te uniemożliwiają modelowanie bardziej skomplikowanych procesów.

Autorzy wielu prac tworząc modele oparte na niehomogenicznych automatach komórkowych posługują się definicją klasycznych, homogenicznych CA np: [DJT01, DJT00], [KMKS01], [Klü03], [WG04, WG05]

Warto zatrzymać się przez chwilę nad przykładami prac wykraczających poza podany w poprzednim rozdziale formalizm (sekcja 2.1.1). Pierwszym przykładem niech będzie połączenie automatów komórkowych z systemem multi-agentowym zastosowane w symulacji ruchu pieszych w centrum handlowym [DJT01],[DJT00]. Kolejnym przykładem niech będzie model Burstedde et al. gdzie zastosowano statyczne i dynamiczne pole potencjalne modyfikujące lokalnie regułę przejścia [BKSZ01]. W pracach Wąsa i Gudowskiego [WG05],[GW05], poświęconych zdolnościom strategicznym pieszych, obok zależności lokalnych w regule przejścia, rozpatrywane są również pewne zależności globalne. W związku z tym istnieje potrzeba zdefiniowania nowej klasy automatów, które umożliwią rozpatrzenie globalnych relacji w całej siatce.

Znaczna liczba prac dotyczących dynamiki pieszych, bardzo ciekawych i o dużym znaczeniu praktycznym, nie porusza w ogóle problematyki formalnego zapisu modelu np. [GSN04],[NSM04] itd.

Zdaniem autora proponowana formalna postać rozszerzonego modelu automatu komórkowego pozwala na realizację kilku ważnych celów:

- daje możliwość uporządkowania i rzetelnego opisu tworzonych modeli,
- stanowi podstawę dla tworzenia aplikacji zgodnie z regułami współczesnej inżynierii oprogramowania,
- ułatwia tworzenie nowych wariantów modelu i ich klasyfikację,
- umożliwia formalne porównanie różnych modeli.

## 4.2 Definicja automatu komórkowego ze stałą siatką $CAL_{const}$

W podrozdziale tym przedstawiono modele oparte na automatach komórkowych w których siatka nie zmienia się w czasie i które określono w pracy E.

Dudek – Dyduch i J. Wąsa [DDW05] i [DDW06]), jako automaty ze stałą siatką. Zaproponowana definicja obejmuje automaty klasyczne (homogeniczne), a równocześnie reprezentuje pewną klasę automatów niehomogenicznych. Stanowiąc będzie ona bazę dla zdefiniowania dowolnych klas automatów niehomogenicznych, w szczególności podanej w następnej sekcji definicji rozszerzonego automatu komórkowego 4.3. Zaproponowane definicje oparte o taki sam aparat pojęciowy, dadzą możliwość porównywania różnych typów automatów komórkowych.

Poniżej przedstawiono pojęcia służące do zdefiniowania opisywanych automatów. Przestrzeń jest reprezentowana jako siatka, złożona ze zbioru cel (komórek). Zbiór cel będziemy oznaczać symbolem  $C$ . Natomiast pojedyncze cele oznaczmy symbolem  $c$ .

W zbiorze  $C$  zdefiniujemy relację przyległości (*ang. adjacent relation*) równanie 4.1:

$$R_p \subset C \times C \quad (4.1)$$

Relacja ta posiada własność symetrii i jest relacją antyzwrotną, a więc zachodzi:

$$c_i R_p c_k \Leftrightarrow c_k R_p c_i \quad \text{oraz} \quad \forall (c_k \in C): (c_k, c_k) \notin R_p \quad (4.2)$$

Relacja  $R_p$  będzie pomocna przy definiowaniu różnych sąsiedztw, w szczególności w tworzeniu siatek nieregularnych. Z kolei poprzez symbol  $L$  będziemy oznaczali siatkę, rozumianą jako zbiór komórek  $C$ , z ustaloną w tym zbiorze relacją przyległości  $R_p$ . Zatem siatka będzie definiowana za pomocą dwójki danej równaniem 4.3

$$L = (C, R_p) \quad (4.3)$$

W przyjętej formalizacji założmy, że definicja sąsiedztwa nie musi być jednakowa dla wszystkich komórek zbioru  $C$ . Daje to możliwość definiowania odmiennie sąsiedztwa dla pewnych wyróżnionych podzbiorów komórek, przykładowo dla cel brzegowych.

Będziemy natomiast zakładać spójność zbioru sąsiedztwa. Dla jej zdefiniowania będziemy wykorzystywać relację przyległości oraz zdefiniowaną na jej podstawie tzw. relację pośredniej przyległości  $R_{pp}$ . Powiemy, że komórka  $c_i$  jest pośrednio przyległa do  $c_k$  wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje ciąg komórek od komórki  $c_i$  do  $c_k$ , które są komórkami przyległymi. Formalnie możemy zapisać (4.4):

$$\begin{aligned} c_i R_{pp} c_k &\Leftrightarrow \exists (c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn}) \quad \text{taki że} \quad c_{j1} = c_i, c_{jn} = c_k \\ &\text{oraz} \quad c_{jm} R_p c_{j(m+1)} \quad \text{dla} \quad m = 1, 2, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Jako sąsiedztwo komórki  $c_k$  będziemy rozumieli wyróżniony zbiór komórek, w którym każda komórka  $c_i$  jest przyległa, bądź pośrednio przyległa do komórki  $c_k$ , czyli  $c_i R_{pp} c_k$ .

Oczywiście,  $c_i R_p c_k \Rightarrow c_i R_{pp} c_k$ , oraz łatwo pokazać, że relacja przyległości jest symetryczna, antyzwrotna i przechodnia.

Sąsiedztwo zdefiniujemy za pomocą odwzorowania  $\eta: C \rightarrow 2^C$ , które każdej komórce  $c_k \in C$  przypisuje podzbiór komórek stanowiących jej sąsiedztwo  $\eta(c_k)$ . (Wyrażenie  $2^C$  oznacza zbiór wszystkich podzbiorów zbioru  $C$ )

Odwzorowanie  $\eta(c_k)$  będzie nazwane funkcją sąsiedztwa. Łatwo zauważyć, że wprowadzenie funkcji sąsiedztwa pozwala na niezależne definiowanie różnych sąsiedztw dla poszczególnych komórek, a także pozwala na definiowanie sąsiedztw o dowolnym (także nieregularnym kształcie). Oczywiście nie wyklucza to sytuacji, gdy sąsiedztwo jest zdefiniowane jednakowo dla wszystkich komórek i ma regularny kształt.

Oznaczmy symbolem  $S$  zbiór stanów komórki. Konfigurację będziemy reprezentować odwzorowaniem  $con: C \rightarrow S$ , które każdej komórce  $c_k$  przyporządkowuje jej stan  $con(c_k)$  (4.5)

$$con(c_k) = s \in S \quad (4.5)$$

Ponieważ konfiguracja określa stany wszystkich komórek, utożsamiać ją będziemy ze stanem całej siatki. Zaś zbiór konfiguracji oznaczmy symbolem  $CON$ . Zbiór ten będzie odpowiadał zbiorowi *stanów automatu*. Z kolei zapis  $s(c_k)$ , będzie używany dla określenia stanu komórki  $c_k$ .

Zmiany konfiguracji będą definiowane za pomocą funkcji przejścia  $f$ :

$$f: CON \rightarrow CON \quad (4.6)$$

Funkcja przejścia  $f$  zdefiniowana w równaniu 4.6, każdej konfiguracji przyporządkowuje kolejną konfigurację:

$$f(con_t) = con_{t+1} \quad (4.7)$$

Funkcja  $f$  jest funkcją globalnej zmiany stanów.

Jak wiadomo, istotą pojęcia automatu komórkowego jest to, że wyznaczenie konfiguracji odbywa się za pomocą lokalnie zdefiniowanego odwzorowania. To odwzorowanie jest wyznaczone kolejno dla każdej komórki należącej do siatki lub dla komórek z pewnych podzbiorów (w przypadku, gdy stan pozostałych komórek się nie zmienia). Zatem, aby zdefiniować funkcję przejścia poniżej wprowadzono lokalne reguły, pozwalające na modelowanie całego systemu.

Oznaczmy restrykcję odwzorowania  $con$  do zbioru  $\eta(c_k)$  jako  $con/\eta(c_k)$ . Zatem  $con/\eta(c_k)$  jest określona tylko dla argumentów ze zbioru  $\eta(c_k)$  i tym

samym określa stany wszystkich komórek należących do sąsiedztwa komórki  $c_k$ .

Niech symbol  $r$  oznacza odwzorowanie lokalne, które na podstawie stanu komórki  $i$ -tej  $s_t(c_k)$  w chwili  $t$  oraz konfiguracji jej sąsiedztwa  $con_t/\eta(c_k)$  w chwili  $t$  wyznacza stan tej komórki w chwili następnej:

$$r(s_t(c_k), con_t/\eta(c_k)) = s_{t+1}(c_k) \quad (4.8)$$

Odwzorowanie to będziemy nazywać *lokalną regułą*.

Można więc już zdefiniować funkcję przejścia  $f$  za pomocą wielokrotnego wyznaczania funkcji lokalnej reguły  $r$  dla kolejnych komórek w przedstawiony poniżej sposób:

$$\begin{aligned} f(con_t) &= con_{t+1}, \quad \text{taka że } \forall c_k \in C, \quad \text{zachodzi} \\ con_{t+1}(c_k) &= s_{t+1}(c_k) = r(s_t(c_k), con_t/\eta(c_k)) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Możemy teraz podać następującą definicję automatu komórkowego ze stałą siatką

**Definicja 4.2.1** Automat komórkowy ze stałą siatką  $CAL_{const}$ , zdefiniujemy jako siódmkę

$$CAL_{const} = (C, R_p, \eta, S, CON, r, f) \quad (4.10)$$

gdzie:

- $C$  - zbiór komórek siatki  $c \in C$
- $R_p$  - relacja przyległości (na podstawie rów. 4.1)
- $\eta$  - funkcja sąsiedztwa
- $S$  - zbiór stanów komórek
- $CON$  - zbiór konfiguracji komórek
- $r$  - lokalna reguła
- $f$  - funkcja przejścia

Należy podkreślić charakterystyczne cechy koncepcji automatu  $CAL_{const}$ :

1. Funkcja przejścia nie jest tożsama z regułą lokalną.
2. Reguła lokalna  $r$  zależy nie tylko od stanów sąsiedztwa  $\eta(c_k)$ , lecz również od stanu komórki  $c_k$ . Oczywiście w szczególnym przypadku funkcja ta może być określona w taki sposób, aby zmiana stanu komórki zależała tylko od stanów sąsiedztwa.
3. Definicja  $CAL_{const}$  jest nieco szersza niż klasyczna definicja automatów homogenicznych 1.1, gdyż dopuszcza niejednakowe sąsiedztwa różnych komórek, zatem obejmuje pewną klasę automatów niehomogenicznych.



4. Siatka komórek zdefiniowana jest za pomocą relacji przyległości, co ułatwia określanie dowolnych nieregularnych siatek.
5. Dowolny automat homogeniczny można przedstawić za pomocą definicji  $CAL_{const}$ , zatem zbiór automatów  $CAL_{const}$  zawiera zbiór automatów klasycznych (homogenicznych).

### 4.3 Rozszerzony model automatu komórkowego

W niniejszym podrozdziale będzie zaprezentowana koncepcja niehomogenicznego automatu komórkowego nazwanego rozszerzonym modelem automatu komórkowego  $ECAL_{const}$  (ang. *Extended Cellular Automaton with Constant Lattice*), który będzie wykorzystywany jako schemat reprezentacji wiedzy o pewnych zachowaniach poruszających się ludzi. Reprezentacja ta została zaproponowana przez autora w celu modelowania *inteligentnych* zachowań jednostek w poruszającym się tłumie.

Aby zilustrować zaproponowany formalizm zaprezentowany zostanie model inteligentnego zachowania ludzi w przypadku opuszczania pomieszczenia o kilku wyjściach przez dużą grupę ludzi. Poszczególne osoby podejmują decyzję o skierowaniu się w kierunku najkorzystniejszego dla nich wyjścia. Zatem w modelu reguła lokalna  $r$  musi uwzględniać fakty, na podstawie których są podejmowane decyzje poszczególnych ludzi oraz reprezentować ich inteligencję. Przykładem takich reguł uwzględniających inteligentne zachowania może być:

- dokonywanie szacowania odległości od poszczególnych wyjść
- dokonywanie analizy zatłoczenia przy poszczególnych wyjściach

Należy zwrócić uwagę na dwie zasadnicze własności definicji automatów komórkowych przedstawionych w podrozdziale 4.2. Po pierwsze, reguła lokalna automatu ze stałą siatką  $CAL_{const}$  przyporządkowuje stan następny każdej komórki w zależności od jej obecnego stanu oraz stanu jej sąsiedztwa. Ponadto zmienia tylko stan tej komórki. Po drugie, funkcja przejścia jest określona za pomocą reguły lokalnej wyznaczanej dla kolejnych komórek, przy czym kolejność aktualizacji poszczególnych komórek siatki nie odgrywa roli. Dla potrzeb modelowania ruchu pieszych model taki nie jest wystarczający i jak wspomniano, reguła jest funkcją przekształcającą informacje w decyzje.

Należy zatem nieco rozszerzyć koncepcję automatu. Zaproponowany model rozszerzonego automatu komórkowego  $ECAL_{const}$  będzie uwzględniał fakt, że:

- reguła lokalna będzie funkcją zmieniającą nie tylko stan jednej komórki, ale zmieniającą też wybrane komórki z jej otoczenia,
- reguła lokalna będzie funkcją przyporządkowującą następny stan komórki, nie tylko na podstawie jej stanu oraz stanów komórek sąsiednich, lecz dodatkowo na podstawie stanów innych komórek.
- reguła lokalna będzie również zależeć od położenia komórki, czyli jej numeru (nazwy). Ponieważ przy stałej siatce położenie komórki jest jednoznaczne dla niej wyznaczane, zatem w regule argumentem będzie nazwa komórki  $c_k$

Regułę lokalną oznaczoną teraz symbolem  $r_{ext}$  możemy przedstawić następującą zależnością:

$$r_{ext}: CON \rightarrow CON \quad \text{taka, że} \quad r_{ext}(c, con_t/\eta^*(c_k), con_t/A) = con_{t+1}/\eta^*(c_k) \quad (4.11)$$

gdzie:

- $A$  - dodatkowy podzbiór komórek, których stan wpływa na przyszły stan komórek z otoczenia,
- $\eta^*(c_k)$  - pełne otoczenie Moore'a komórki, czyli z włączeniem do niego komórki centralnej  $\eta^*(c_k) = \eta(c_k) \cup \{c_k\}$ ,
- $con_t/\eta^*(c_k)$  - konfiguracja w chwili  $t$  ograniczona do komórek  $\eta^*(c_k)$ ,

Zmienimy też nieco definicję funkcji przejścia przyjmując, że w algorytmie jej obliczania *istotna jest kolejność przeglądania komórek*. Taki model automatu komórkowego będziemy nazywać *automatem komórkowym rozszerzonym* (ang. *extended*) i będziemy oznaczać  $ECAL_{const}$ .

Możemy teraz podać formalną definicję tzw. rozszerzonego automatu komórkowego

**Definicja 4.3.1** Automat komórkowy ze stałą siatką oznaczany symbolem  $ECAL_{const}$ , zdefiniujemy jako siódmkę (równanie 4.12):

$$ECAL_{const} = (C, R_p, \eta, S, CON, r_{ext}, f) \quad (4.12)$$

gdzie:

- $C, R_p, \eta, S, CON$  - oznaczenia identycznie jak w def. 4.2.1
- $r_{ext}$  - lokalna reguła (na podstawie rów. 4.11)
- $f$  - funkcja przejścia (w której istotna jest kolejność aktualizacji stanów komórek)

Podkreślimy istotne cechy automatu  $ECAL_{const}$ :

1. Automat  $ECAL_{const}$  jest automatem niehomogenicznym.
2. Reguła lokalna może być różna dla różnych komórek.
3. Reguła lokalna może uwzględniać informacje o stanach wyróżnionych komórek spoza sąsiedztwa.
4. Dla obliczenia kolejnej konfiguracji istotna jest kolejność aktualizowania stanów komórek w danej iteracji (kroku czasowym). W szczególności stan komórek może zmieniać się więcej niż jeden raz podczas obliczania tej konfiguracji.

## Rozdział 5

# Proponowane modele dynamiki pieszych

*Rozdział zawiera zaproponowane przez autora modele dynamiki pieszych, opisujące opuszczanie pomieszczenia przez grupę pieszych. Opis każdego z modeli bazuje na formalnej definicji automatu komórkowego zaproponowanej przez autora w poprzednim rozdziale. W pierwszej kolejności opisano model bazowy, oparty w dużej mierze na modelach spotykanych w literaturze. Następnie zaproponowano model strategicznych zdolności pieszych nazwany SPA, w którym piesi podejmują decyzje co do ruchu na podstawie funkcji kosztu. Jako ostatni zaproponowano model dla sytuacji ewakuacyjnych, rozpatrujący zmiany w „płynności” przepływu ludzi związane z generowaniem konfliktów w wąskich gardłach, nazwany SPA-BNE. Opis każdego z wymienionych modeli składa się z dwóch części. Pierwsza z tych części obejmuje podanie ogólnej charakterystyki modelu wraz z przedstawieniem przyjętych założeń. Natomiast druga część prezentuje zaproponowany formalny opis modelu.*

### 5.1 Wprowadzenie

Sytuacją, która została zamodelowana w niniejszej pracy jest opuszczanie pomieszczenia przez grupę pieszych przez kilka dostępnych wyjść. Przedstawione modele są oparte na automatach komórkowych z dwuwymiarową, kwadratową siatką, gdzie rozpatrywane jest sąsiedztwo Moore’a.

Komórki siatki dzielą się na kilka klas i mogą reprezentować ściany, przeszkody, wyjścia czy przestrzeń ruchu itd. Poszczególne piesi są reprezentowani w modelu za pomocą zajętości komórki należącej do przestrzeni ruchu ( $c \in MS$ ) za pomocą stanu:  $s(c_k) = 1$ . Przestrzeń ruchu  $MS$  (ang. *Movement space*) oznacza komórki siatki dostępne dla ruchu pieszych.

Na początku symulacji w komórkach siatki reprezentujących przestrzeń ruchu, generujemy populację pieszych, których ruch jest rejestrowany w dyskretnych przedziałach czasowych. W kolejnych krokach symulacji piesi, według zadanego algorytmu kierują się w stronę komórek reprezentujących wyjścia.

We wszystkich modelach zastosowano pole potencjalne Bouviera [BCN97] dla realizacji funkcji przejścia. Koncepcja pola zaproponowanego przez Bouviera polega na tym, że do każdej z komórek (cel) siatki przypisuje się pewną wartość liczbową zwaną potencjałem, uzależnioną od odległości od najbliższej komórki będącej wyjściem z pomieszczenia. Kiedy przypiszemy tej reprezentującej wyjście komórce wartość 0, to wszystkie komórki przyległe (otoczenie Moore’a promień  $R = 1$ ), należące do przestrzeni ruchu będą miały potencjał równy 1 ( $P = 1$ ). Z kolei komórki należące do otoczenia Moore’a o promieniu  $R = 2$  będą miały przypisaną wartość potencjału równą 2 ( $P = 2$ ) itd. W ten sposób pole potencjalne propagowane jest od każdego z wyjść na całą siatkę automatu. W przypadku rozpatrywania propagacji pola potencjalnego od dwóch lub więcej komórek reprezentujących wyjście, przyjętą wartością dla danej komórki jest minimalna wartość potencjału (czyli odległość od najbliższego wyjścia w tej przestrzeni metrycznej).

## 5.2 Model bazowy

### 5.2.1 Klasyczna i nieklasyczna formuła CA w dynamice pieszych

W symulacji dynamiki pieszych stosuje się rozmaite modele, najczęściej niehomogeniczne automaty komórkowe (patrz sekcja 3.4.2), będące rozbudowaniem klasycznej formuły automatów komórkowych.

Nasuwa się podstawowe pytanie: czy warto, albo wręcz czy jest możliwe zastosowanie klasycznego automatu komórkowego do badania dynamiki pieszych. Aby odpowiedzieć na to pytanie rozważmy przykład automatu działającego na regularnej siatce, składającej się z kwadratowych cel, gdzie poszczególne cele mogą przyjmować stan „pusty” lub „zajęty” przez pojedynczego człowieka.

Już na początku możemy zaobserwować, że postulat synchroniczności aktualizacji stanów automatu nie może być zrealizowany bez dodatkowych mechanizmów rozwiązywania konfliktów.

Ponadto jeżeli chcemy na siatce reprezentować wyróżnione komórki jak: ściany, przeszkody czy wyjścia, automatycznie nie spełniamy postulatu o jednakowym zbiorze stanów dla całej siatki.

W dynamice pieszych w wielu sytuacjach obserwujemy turbulencje, nieregularności w ruchu pieszym. Aby oddać te zjawiska w modelu symulacyjnym potrzeba zawrzeć w algorytmie ruchu pewien czynnik losowy. Wtedy jednakże automat komórkowy staje się automatem probabilistycznym. Funkcja przejścia zależy wówczas od zmiennej losowej.

W przypadku wielu modeli, funkcja przejścia zostaje poddawana lokalnym modyfikacjom poprzez dodawanie dodatkowych warstw do modelu (jak dynamiczne pola potencjalne czy siatki grafów). Jest to kolejny powód dla którego zastosowany automat komórkowy nie mieści się w klasycznej formule. Klasyczna formuła automatu nie pozwala bowiem na odtworzenie zindywidualizowanych, „inteligentnych” reguł działania automatu, które pozwoliłyby przejść od prostego systemu regulowego do metod sztucznej inteligencji.

Dlatego też, zdaniem autora, niemożliwe jest przeprowadzenie skutecznej i realistycznej symulacji dynamiki pieszych, opierając się wyłącznie na klasycznej definicji automatu komórkowego. Podobny problem występuje dla szerszej klasy problemów – modelowania systemów złożonych, gdzie klasyczna formuła automatu komórkowego jest zdecydowanie niewystarczająca.

### 5.2.2 Ogólna charakterystyka modelu

Pierwszy z przedstawionych w pracy modeli jest najbardziej bliski klasycznemu automatu komórkowemu. W sekcji 5.2.1 przedstawiono powody dla którego niemożliwe jest stworzenie automatu komórkowego, zgodnego z klasyczną definicją do skutecznej i realistycznej symulacji dynamiki pieszych, dlatego też zaproponowany model bazowy nie jest oczywiście klasycznym automatem komórkowym.

Przedstawiony model bazowy jest reprezentowany za pomocą szczególnej postaci automatu  $ECAL_{const}$  (opisanego w sekcji 4.3). W automacie tym reguła  $r_{ext}$  nie zależy od stanów wyróżnionego zbioru komórek  $A - cont/A$ , lecz zależy od położenia danej komórki na siatce.

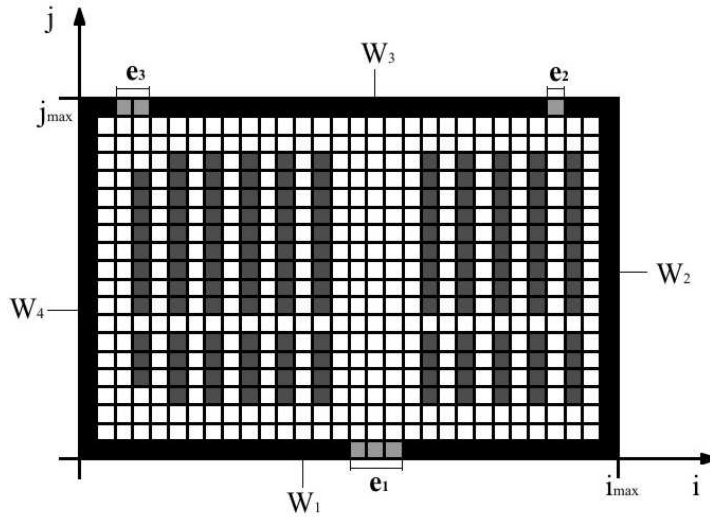
Z punktu widzenia modelu opuszczania pomieszczenia przez pieszych, początkowe położenie pieszego jest więc czynnikiem, który predestynuje wybór wyjścia z pomieszczenia (rozpatrywane jest wyłącznie kryterium odległości od wyjścia).

Celem proponowania bazowego modelu jest otwarcie możliwości porównania efektywności, funkcjonalności i stopnia realizmu tego relatywnie prostego modelu z innymi, bardziej złożonymi modelami.

### 5.2.3 Formalny zapis modelu bazowego

Przy budowie formalnego modelu wykorzystano prace autorstwa E. Dudek–Dyduch i J. Wąsa [DDW05, DDW06]. Model bazowy zostanie przedstawiony za pomocą struktury  $(C, R_p, \eta, S, CON, r_{ext}, f)$  zgodnie z zaproponowaną w niniejszej pracy definicją (w rozdziale 4.12).

**Zbiór komórek siatki  $c \in C$**  Na rysunku (rys. 5.1) przedstawiono przykładową topologię pomieszczenia. Piesi opuszczają dane pomieszczenie reprezentowane siatką kwadratową  $L = (C, R_p)$ . Siatka składa się ze zbioru komórek  $C$ , gdzie każda komórka  $c$  indeksowana jest za pomocą dwóch wskaźników  $c_{i,j}$  gdzie  $1 \leq i \leq i_{\max}$ ,  $1 \leq j \leq j_{\max}$  lub zapisując skrótowo poprzez nr komórki  $c_k$ . Przyjęte w modelu sąsiedztwo  $\eta(c_k)$  to sąsiedztwo Moore’a. Topologia pomieszczenia przedstawionego na rys. 5.1 jest identyczna jak w przypadku pozostałych modeli.



Rysunek 5.1: Przykładowa topologia pomieszczenia.

Rozpatrując komórki zbioru  $C$ , czyli wszystkie komórki siatki wyróżniamy następujące podzbiory komórek (Rys. 5.1):

- zbiór wyjść oznaczany jako  $E$ . W rozważanym modelu wyjście odpowiada kilku komórkom i oznaczane jest jako  $e$ . Każde wyjście składa się z podzbioru przyległych komórek i tak np.:  $e_1 = \{c_{1,16}, c_{1,17}, c_{1,18}\}$ .
- zbiór komórek odpowiadających ścianom  $W = W_1 \cup W_2 \cup W_3 \cup W_4$ , gdzie

$W_k$  reprezentuje komórki  $k$ -tej ściany. Przykładowo pierwsza ściana  $W_1$  jest definiowana jako  $W_1 = \{c_{ij} \in C : j = 1 \text{ and } 1 \leq i \leq i_{\max}\}$ .

- zbiór komórek reprezentujących wewnątrz pomieszczenia składający się z podzbioru komórek reprezentujących przeszkody (np. krzesła) oznaczanego  $O$  oraz podzbioru komórek stanowiących przestrzeń dla ruchu ludzi oznaczanego  $MS$ .

**Relacja przyległości  $R_p$**  Przyjęta w modelu relacja przyległości  $R_p$  pokrywa się z naturalną relacją przyległości w siatkach kwadratowych.

**Relacje sąsiedztwa  $\eta(c_k)$**  Jako sąsiedztwo  $\eta$  dla każdej komórki  $c_k$  przyjęto sąsiedztwo Moore'a.

**Zbiór stanów komórek** Zbiór stanów komórek  $S = \{0, 1\}$  należących do przestrzeni ruchu  $c \in MS$ , gdzie  $s(c_k) = 0$  oznacza pustą komórkę, zaś  $s(c_k) = 1$  oznacza komórkę zajętą przez jednego pieszego [Klü03].

**Zbiór konfiguracji** Zbiór konfiguracji reprezentuje wszystkie możliwe rozkłady stanów komórek należących do  $MS$ .

**Reguła przejścia** Reguła lokalna  $r_{ext}$  zależy od położenia komórki  $c_k$  na siatce i stanu otoczenia komórki  $\eta(c_k)$ . Nie zależy ona od stanów wyróżnionego zbioru komórek  $A - con_t/A$ .

Reguła dla osobnika znajdującego się w komórce  $c_k \in MS$  jest realizowana następująco:

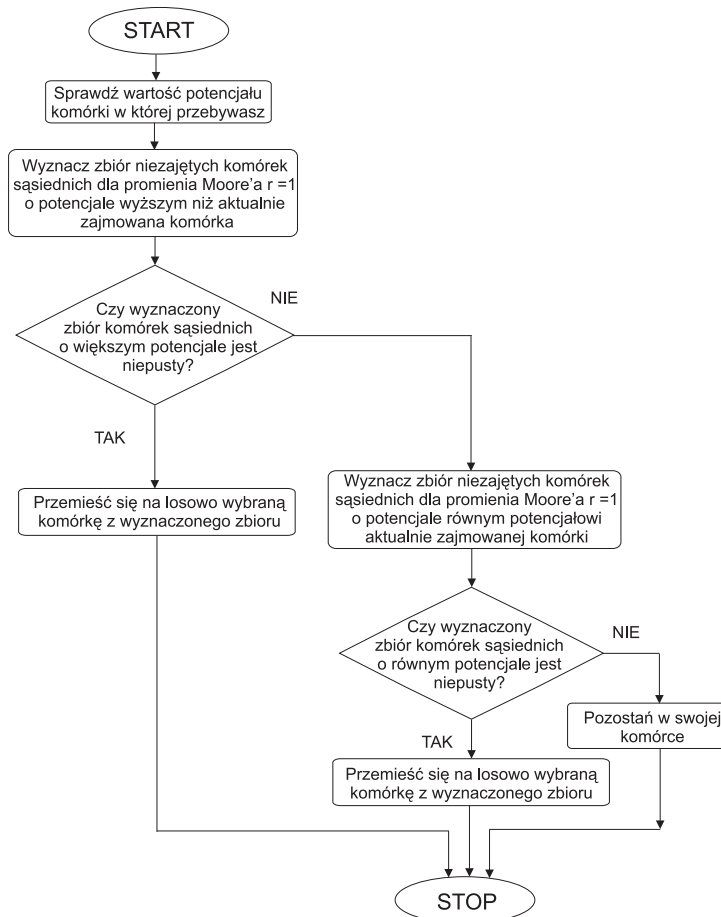
1. Odczytywana jest wartość potencjału  $P$  danej komórki  $c_k$ . Umożliwia to wskazanie najkrótszej drogi  $dist(c_k, e_x)$  w sensie najmniejszej liczby komórek drogi pomiędzy  $c_k, c_l$  takiej, że  $c_k \in e_x$ , gdzie droga  $w(c_k, c_l)$  z  $c_k$  do  $c_l$  to ciąg przyległych komórek łączących  $c_k$  z  $c_l$ . Wybrane najbliższe wyjście oznaczone jest symbolem  $e^*$ .
2. Analizowany jest stan otoczenia  $con_t/\eta(c_k)$  komórki  $c_k$  i wybierana jest pusta komórka  $c_m$  przyległa do  $c_k$  i należąca do drogi  $w(c_k, e^*)$ , a jeśli nie ma takiej komórki pustej, to wybierana jest pusta komórka przyległa będąca najbliżej drogi  $w(c_k, e^*)$  w kierunku wyjścia  $e^*$ .
3. Modyfikowany jest stan komórki  $c_m$ :  $s_{t+1}(c_m) = 1$ .
4. Modyfikowany jest stan komórki  $c_k$ :  $s_{t+1}(c_k) = 0$



**Funkcja przejścia** Funkcja przejścia modyfikuje iteracyjnie stany komórek w ustalonej kolejności za pomocą reguły  $r_{ext}$ , przy czym:

- jeżeli stan komórki zmienia się z 0 na 1, to stan ten nie może się już zmienić w danym takcie (pomimo późniejszego przeglądania komórek w danym takcie),
- jeżeli stan komórki zmienia się z 1 na 0, to może zmienić się ponownie na 1 w tym samym takcie.

Algorytm ruchu jednostki dla modelu klasycznego przedstawiono na rysunku 5.2:



Rysunek 5.2: Algorytm ruchu pojedynczego pieszego dla modelu bazowego

Porządek modyfikacji stanów komórek realizowany jest funkcją przejścia  $f$  i wyznaczany jest w oparciu o tzw. listę pieszych. Piesi są uporządkowa-

ni na liście według określonego kryterium, przykładowo może to być numer identyfikacyjny związany z kolejnością alokacji pieszego na siatce. Lista ta jest przeglądana w każdym kroku czasowym. Poszczególni piesi mają możliwość wykonania ruchu w danym kroku czasowym zgodnie z porządkiem przeglądania listy. Na tej podstawie możemy stwierdzić, że zaproponowany model jest *asynchronicznym automatem komórkowym*.

## 5.3 Model SPA

### 5.3.1 Ogólna charakterystyka modelu

Zaproponowany model strategicznych zdolności pieszych, nazwany w skrócie SPA (*ang. Strategic Pedestrian Abilities*), jest oparty na niehomogenicznych automatach komórkowych z dwuwymiarową, kwadratową siatką, gdzie rozpatrywane jest sąsiedztwo Moore'a. Część elementów modelu niniejszego modelu powstało w oparciu o prace J. Wąsa i B. Gudowskiego [WG04], [WG05], [Wąs05].

Podobnie jak w modelu bazowym piesi reprezentowani są w modelu SPA za pomocą zajętości komórki należącej do przestrzeni ruchu za pomocą stanu:  $s(c_k) = 1$ , dla  $c \in MS$  i opuszczają oni pomieszczenie przez dostępne wyjścia. W odróżnieniu od modelu bazowego zaproponowany model SPA uwzględnia inteligencję jednostek, rozumianą jako wykorzystanie w procesie decyzyjnym pewnych informacji o środowisku.

Należy wymienić trzy najważniejsze powiązane ze sobą elementy, odróżniające model SPA od modelu bazowego:

- zaproponowana jest nowa reguła lokalna, która odzwierciedla proces decyzyjny pieszego z uwzględnieniem obserwacji otoczenia,
- w funkcji przejścia zaproponowana jest również nowa metoda kolejności aktualizacji stanów komórek siatki,
- zaproponowany jest nowy algorytm ruchu.

W modelu tym piesi podejmują decyzję związaną z wyborem wyjścia, przez które mogą, według własnego rozeznania, najszybciej opuścić pomieszczenie. W procesie podejmowania decyzji stosują oni dwa zasadnicze kryteria:

- pierwszym z kryteriów jest odległość od poszczególnych wyjść, liczona jako wartość pola potencjalnego generowanego od każdego z wyjść [BCN97].
- drugim kryterium jest gęstość tłumu wokół wyjść

Inną różnicą między modelem bazowym i modelem SPA jest zasada generowania pola potencjalnego. W modelu bazowym jest wygenerowane jedno, wspólne pole potencjalne dla wszystkich wyjść, zaś w modelu SPA dla każdego wyjścia generowane jest osobne pole potencjalne, czyli dla każdej komórki siatki rozpatrujemy pewien wektor wartości potencjałów.

### 5.3.2 Formalny opis modelu

Podobnie jak model bazowy, model SPA zostanie przedstawiony za pomocą struktury  $(C, R_p, \eta, S, CON, r_{ext}, f)$  zgodnie z zaproponowaną w niniejszej pracy definicją (w rozdziale 4.12).

**Komórki siatki** Topologia pomieszczenia (rys. 5.1) jest analogiczna jak w modelu bazowym. Tu również pomieszczenie reprezentowane jest siatką kwadratową  $L = (C, R_p)$ , zatem każda komórka  $c$  indeksowana jest za pomocą dwóch wskaźników  $c_{i,j}$ , gdzie  $1 \leq i \leq i_{\max}$ ,  $1 \leq j \leq j_{\max}$ , lub zapisując skrótowo za pomocą indeksu  $c_k$  oznaczającego jej numer.

Analogicznie w zbiorze  $C$  wyróżniamy następujące podzbiory komórek 5.1:

- zbiór wyjść oznaczany jako  $E$  przy czym wyjścia mogą być różnie definiowane. W rozważanym modelu wyjście odpowiada kilku komórkom i oznaczane jest jako  $e$ . Każde wyjście składa się z podzbioru przyległych komórek i tak np.:  $e_1 = \{c_{1,16}, c_{1,17}, c_{1,18}\}$  (Rys. 5.1).
- zbiór komórek odpowiadających ścianom  $W = W_1 \cup W_2 \cup W_3 \cup W_4$  gdzie  $W_k$  reprezentuje komórki  $k$  - tej ściany. Przykładowo pierwsza ściana  $W_1$  jest definiowana jako  $W_1 = \{c_{ij} \in C : j = 1 \text{ oraz } 1 \leq i \leq i_{\max}\}$  (Rys. 5.1).
- zbiór komórek reprezentujących wnętrze pomieszczenia; zbiór ten składa się z podzbioru komórek reprezentujących przeszkody, oznaczanego  $O$  (*ang. Obstacles*) oraz podzbioru komórek stanowiących przestrzeń dla ruchu ludzi oznaczanego  $MS$  (*ang. Movement space*).

**Relacja przyległości  $R_p$**  Podobnie jak w modelu bazowym przyjęta relacja przyległości  $R_p$  pokrywa się z naturalną relacją przyległości w siatkach kwadratowych.

**Relacje sąsiedztwa  $\eta(c_k)$**  Analogicznie jak w modelu bazowym jako sąsiedztwo  $\eta$  dla każdej komórki  $c_k$  przyjęto sąsiedztwo Moore'a.

**Zbiór stanów  $S$**  W modelu SPA podobnie jak w modelu bazowym zbiór stanów  $S = \{0, 1\}$ , gdzie  $s(c_k) = 0$  oznacza pustą komórkę, zaś  $s(c_k) = 1$  oznacza komórkę zajętą przez jednego pieszego.

**Zbiór konfiguracji** Zbiór konfiguracji reprezentuje wszystkie możliwe rozkłady stanów komórek należących do  $MS$ .

**Reguła przejścia  $r_{ext}$**  Reguła przejścia w modelu SPA jest zupełnie inna niż w modelu bazowym. Reguła ta zależy zarówno od stanu komórki i jej otoczenia:  $con(\eta^*(c_k))$ , stanów komórek w pobliżu wyjść reprezentujących stopień zatłoczenia (komórki te należą do zbioru  $A$ ) oraz położenia komórki  $c_k$  na siatce. Podzbiór komórek stanowiących wyróżnione w modelu otoczenia poszczególnych wyjść odpowiada zbiorowi  $A$  w definicji reguły. Nowa wartość stanów otoczenia pełnego jest ustalana w wyniku zastosowania reguły  $r_{ext}$ .

Reguła, dla osobnika znajdującego się w komórce  $c_k \in MS$ , oznaczona skrótowo  $r_{ext}$  jest realizowana następująco:

1. Określana jest funkcja kosztu  $cost(c_k, e_x)$  dla każdego z wyjść  $e_x \in E$ :

$$cost(c_k, e_x) = w_1 \cdot dist(c_k, e_x) + w_2 \cdot dens(e_x) \quad (5.1)$$

gdzie:

- $w_1, w_2$  - ustalone współczynniki, dla których  $w_1 + w_2 = 1$
- $dist(c_k, e_x)$  - najmniejsza liczba komórek stanowiących drogę od komórki  $c_k$  do którejkolwiek komórki wyjścia  $e_x$  (czyli długość najkrótszej drogi pomiędzy  $c_k, c_l$  takiej, że  $c_l \in e_x$ , gdzie droga  $w(c_k, c_l)$  z  $c_k$  do  $c_l$  to ciąg przyległych komórek łączących  $c_k$  z  $c_l$ ).
- $dens(e_x)$  - funkcja charakteryzująca gęstość tłumu w otoczeniu  $A(e_x)$  wokół danego wyjścia  $e_x$ , dana wzorem(5.2).

$$dens(e_x) = \frac{\sum_{c_k \in A(e_x)} s(c_k)}{|A(e_x)|} \quad (5.2)$$

gdzie:

- $|A(e_x)|$  - liczba komórek należących do otoczenia  $e_x$ , dla danego promienia Moore'a

2. Wybrane jest to wyjście  $e^*$  dla którego koszt  $cost(c_k, e^*)$  jest najmniejszy.
3. Analizowany jest stan otoczenia komórki  $c_k$ ,  $con_t/\eta(c_k)$  i wybierana jest pusta komórka  $c_m$  przyległa do  $c_k$  i należąca do drogi  $w(c_k, e^*)$

a jeśli nie ma takiej komórki pustej, to wybierana jest pusta komórka przyległa będąca najbliższej drogi  $w(c_k, e^*)$  w kierunku wyjścia  $e^*$ .

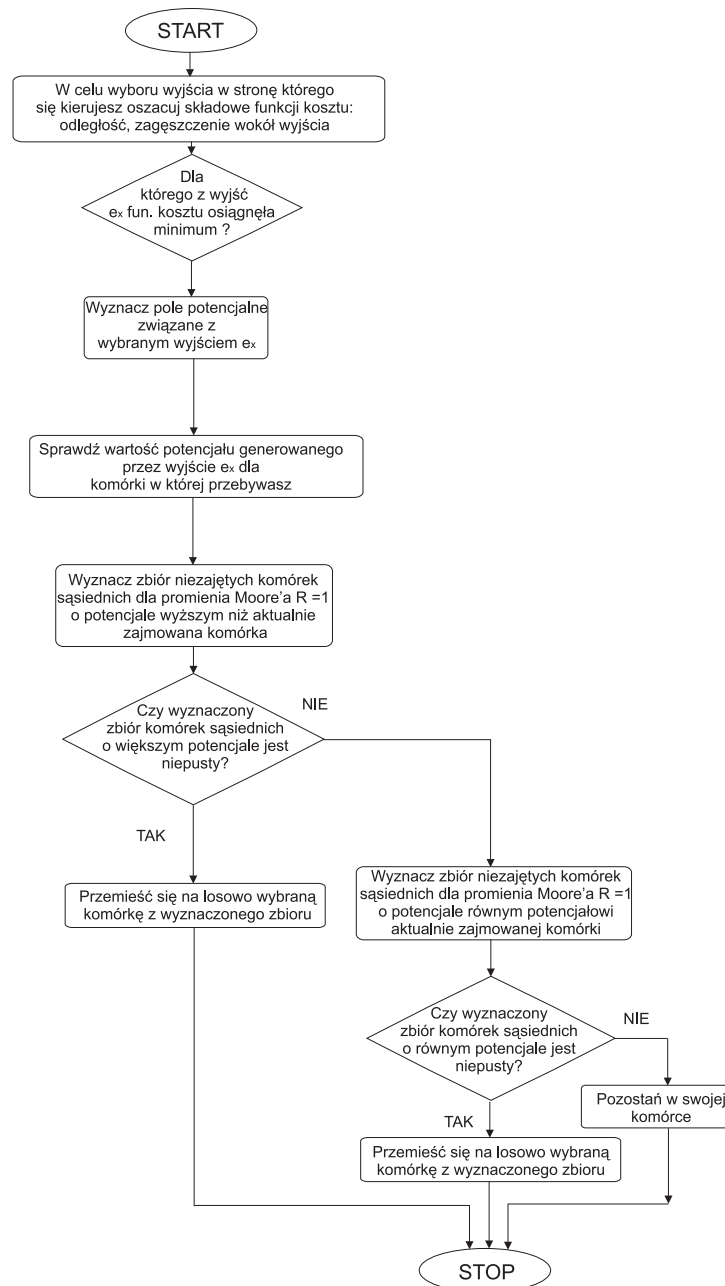
4. Modyfikowany jest stan komórki  $c_m$ :  $s_{t+1}(c_m) = 1$ .

5. Modyfikowany jest stan komórki  $c_k$ :  $s_{t+1}(c_k) = 0$

**Funkcja przejścia  $f$**  Funkcja przejścia modyfikuje iteracyjnie stany komórek w ustalonej kolejności za pomocą reguły  $r_{ext}$ , przy czym:

- jeżeli stan komórki zmienia się z 0 na 1, to stan ten nie może się już zmienić w danym takcie (pomimo późniejszego przeglądania komórek w danym takcie),
- jeżeli stan komórki zmienia się z 1 na 0, to może zmienić się ponownie na 1 w tym samym takcie.

Porządek modyfikacji stanów komórek jest w modelu zdefiniowany od wejść w głąb pomieszczenia zgodnie ze zmianą gradientu potencjału, metodą *rozchodzącej się fali*. Oznacza to, że w każdym kroku czasowym piesi szeregowani są w zależności od odległości od wyjścia (zgodnie z potencjałami zajmowanych komórek). W sytuacji, gdy piesi znajdują się na polu o jednakowym potencjale, pierwszeństwo ruchu mają ci, którzy oczekują przez więcej kroków czasowych. Uszeregowanie pieszych ma dać w założeniu realistyczny obraz ruchu pieszych w oparciu o reguły systemów kolejkowych. Model SPA jest więc asynchronicznym automatem komórkowym. Dokładny algorytm ruchu jednostki w modelu *SPA* przedstawiono na rysunku 5.3.



Rysunek 5.3: Algorytm ruchu pojedynczego pieszego dla modelu SPA

## 5.4 Model SPA–BNE

### 5.4.1 Ogólna charakterystyka modelu

Opisywane wcześniej modele dynamiki pieszych tzn. model klasyczny i model strategicznych zdolności pieszych SPA zakładają „płynność” ruchu przy

zachowaniu ustalonej kolejności opuszczania pomieszczenia podobnie jak w systemach kolejkowych typu *FIFO*. Natomiast często w sytuacjach ewakuacyjnych, a w szczególności podczas zaistniałej paniki można obserwować zaburzenie tego uporządkowania ruchu. Uwidacznia się to przez zaistniałe konflikty, blokady i wzajemne przepychanie się pieszych. Zjawisko to może występować lokalnie lub też na większych obszarach. Zdaniem autora zjawisko konfliktów i przepychania się pieszych występuje przy równoczesnym występowaniu trzech czynników:

- uwarunkowaniu geometrycznym w postaci *wąskich gardeł* w pomieszczeniu tzn. lokalnych zwężeń drogi ruchu pieszych,
- wystąpieniu dużego zagęszczenia pieszych w otoczeniu wąskiego gardła, (czyli przebywanie pewnej krytycznej liczby ludzi w sąsiedztwie *wąskiego gardła*),
- zaistnieniu wysokiego stopnia determinacji (zdenerwowania) ludzi, wynikającego z sytuacji zagrożenia zdrowia czy życia, zniecierpliwienia długim oczekiwaniem itd.

W celu umożliwienia uwzględnienia opisanych powyżej sytuacji konfliktowych zaproponowano utworzenie nowego modelu, na bazie już istniejących modeli.

Pierwszym krokiem związanym z budową nowego modelu jest zlokalizowanie miejsc predestynowanych do tworzenia się blokad, czyli *wąskich gardeł*.

Autor proponuje, aby rozpatrując siatkę kwadratową automatu komórkowego z naniesionym polem potencjalnym, traktować każdą komórkę tej siatki jako element posiadający pewną liczbę wejść i wyjść, w postaci komórek odpowiednio o „gorszym” czy „lepszem” potencjale. Lepszy potencjał komórek sąsiedztwa oznacza, że te komórki znajdują się bliżej źródła potencjału niż bieżąca komórka w rozpatrywanej przestrzeni metrycznej. Natomiast potencjał gorszy oznacza, że komórki te znajdują się dalej od źródła potencjału.

<sup>1</sup>

Stosunek liczby komórek wyjściowych do liczby komórek wejściowych określa *miarę przepustowości danej komórki*. W przypadku, gdy stosunek ten jest mniejszy od 1 mamy do czynienia z *wąskim gardłem*. W ten sposób wyznaczane są na siatce miejsca szczególnie narażone na blokady, które

---

<sup>1</sup>Wprowadzenie pojęć lepszego i gorszego potencjału ma na celu jednoznaczność pojęć, ponieważ z fizycznego punktu widzenia źródło potencjału posiada największą wartość potencjału, z kolei patrząc od strony implementacyjnej najlepiej, aby komórki źródła potencjału posiadały najmniejszą wartość.

są charakteryzowane poprzez opisaną powyżej miarę przepustowości komórki. Wraz ze spadkiem przepustowości komórki wzrasta prawdopodobieństwo blokady pieszych w tym miejscu.

Właśnie istnienie blokad w kontekście wąskich gardeł w modelu spowodowało nadanie nazwy modelowi SPA–BNE, tzn. (*ang. BottleNeck Effect*).

Na rysunku 5.4 przedstawiono przykład wąskiego gardła na siatce. Poszczególne pola oznaczone są liczbami określającymi odległość od wyjścia. Komórki czarne reprezentują ściany, komórki niebieskie reprezentują wyjścia, zaś pozostałe komórki należą do przestrzeni ruchu pieszych. Kolorem różowym oznaczono komórki reprezentujące wąskie gardła, czyli takie dla których liczba komórek sąsiednich o lepszym potencjale jest mniejsza niż komórek o gorszym potencjale.



Rysunek 5.4: Przykłady wąskich gardeł na siatce, gdzie komórki mają przypisane wartości pola potencjalnego

### 5.4.2 Formalny zapis modelu SPA–BNE

Model SPA–BNE zostanie przedstawiony za pomocą następującej struktury  $(C, R_p, \eta, S, CON, r_{ext}, f)$ , zgodnie z zaproponowaną w niniejszej pracy definicją (w rozdziale 4.12).

**Komórki siatki  $C$**  Komórki siatki dzielą się na kilka klas do których należą komórki będące ścianami czy przeszkodami, komórki–wyjścia oraz komórki należące do przestrzeni ruchu  $MS$ , podobnie jak w poprzednich rozdziałach.

Różnicą w stosunku do modelu  $SPA$  jest zdefiniowanie przez autora w zbiorze komórek  $MS$  podzbioru komórek  $BN \subset MS$ , które są *wąskimi gardłami*.



Rozpatrzmy komórkę siatki  $c_k \in MS$ . Komórka  $c_k$  ma przypisaną wartość potencjału  $P(c_k)$ . Dla danej komórki istnieją komórki sąsiedztwa  $c_l \in \eta(c_k)$  dla których potencjał może być lepszy, gorszy bądź równy. Przyjmując implementacyjny punkt widzenia przyjmijmy, że komórki źródła potencjału posiadają najniższą liczbową wartość potencjału, a pojęcie lepszy potencjał, oznacza w tym wypadku niższy potencjał. Rozpatrzmy zatem dwa podzbiory komórek  $c_l$  należących do sąsiedztwa komórki  $c_k$ : podzbiór  $M(c_l)$  o potencjale lepszym(niższym) niż potencjał komórki  $c_k$  oraz podzbiór  $N(c_l)$  o potencjale gorszym(wyższym) wówczas w określonej chwili czasowej zachodzi:

- zbiór  $M(c_l) = \{c_l \in C, c_l \in \eta(c_k) \text{ takich, że } P(c_l) < P(c_k)\}$
- zbiór  $N(c_l) = \{c_l \in C, c_l \in \eta(c_k) \text{ takich, że } P(c_l) > P(c_k)\}$

Wprowadźmy teraz pojęcie *stopnia wąskiego gardła*:

**Definicja 5.4.1** *Stopień wąskiego gardła  $Y(c_k)$  inaczej przepustowość komórki  $c_k \in BN$  to stosunek liczby komórek należących do sąsiedztwa komórki  $c_k$  o potencjale lepszym do liczby komórek sąsiedztwa o potencjale gorszym.*

$$Y(c_k) = \frac{|M(c_l)|}{|N(c_l)|} \quad (5.3)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} |M(c_l)| & - \text{moc zbioru } M(c_l) \in \eta(c_k) \\ & \text{dla których potencjał } P(c_l) < P(c_k) \\ |N(c_l)| & - \text{moc zbioru } N(c_l) \in \eta(c_k) \\ & \text{dla których potencjał } P(c_l) > P(c_k) \end{aligned}$$

**Definicja 5.4.1** *Komórka  $c_k$  jest wąskim gardłem wtedy i tylko wtedy, gdy jej stopień  $Y(c_k)$  ma wartość większą od 1.*

Komórka  $c_k \in BN$  będąca wąskim gardłem stanowi miejsce potencjalnego wystąpienia blokady. Prawdopodobieństwo blokady wiąże się z wymienionymi wcześniej następującymi czynnikami: zagęszczeniem pieszych w sąsiedztwie wąskiego gardła, determinacją i stopniem współzawodnictwa ludzi (zależnie od rozpatrywanej sytuacji), a także przepustowością danej komórki. Dokładny opis mechanizmu występowania wąskich gardeł umieszczono w podpunkcie dotyczącym reguły przejścia.

**Relacja przyległości  $R_p$**  Przyjęta relacja przyległości  $R_p$  pokrywa się z naturalną relacją przyległości w siatkach kwadratowych, podobnie jak w modelu bazowym i modelu SPA.

**Relacje sąsiedztwa  $\eta(c_k)$**  Jako sąsiedztwo  $\eta$  dla każdej komórki  $c_k$  przyjęto sąsiedztwo Moore’a, analogicznie jak w modelu bazowym oraz modelu SPA.

**Zbiór stanów** Różnica w stosunku do modelu SPA jest następująca: komórki należące do klasy  $BN \subset MS$  mogą przyjmować stany:  $s = \{0, 1, 2\}$ , gdzie  $s(c_n) = 2$  oznacza komórkę niezajętą przez pieszego–zablokowaną, na którą nie można wykonać ruchu. Gdy komórka przyjmuje stan „zablokowana”, oznacza to, że komórka nie może zmienić stanu na 1 lub 0, aż do zakończenia danego kroku czasowego (modyfikacji stanów wszystkich komórek).

**Zbiór konfiguracji** Zbiór konfiguracji reprezentuje wszystkie możliwe rozkłady stanów komórek należących do  $MS$ . Należy jednak zwrócić uwagę, na zmianę zbioru konfiguracji wynikającą ze zmiany zbioru stanów komórek należących do  $MS$ , analogicznie jak w dwóch poprzednich modelach.

**Reguła przejścia** Do obliczenia reguły przejścia konieczne jest obliczenie prawdopodobieństwa blokady. Przyjęto następującą zasadę powstawania blokady. Prawdopodobieństwo powstawania blokady  $p$  jest równe iloczynowi:

$$p = dens_{BN}(c_n) \cdot (1 - Y(c_n)) \cdot p_{glob} \quad (5.4)$$

gdzie:

- $dens_{BN}(c_n)$  - zagęszczenie tłumu wokół komórki  $c_n$ , będącej wąskim gardłem, opisane równaniem (5.5)
- $Y(c_n)$  - stopień wąskiego gardła
- $p_{glob}$  - globalne prawdopodobieństwo blokady, określane w zależności od stopnia determinacji pieszych, stanowiące parametr w badaniach symulacyjnych

Z kolei zagęszczenie tłumu wokół komórki będącej wąskim gardłem:

$$dens_{BN}(c_n) = \frac{\sum_{c_n \in \eta(c_n), s(c_n) \neq 2} s(c_n)}{|\eta(c_n)|} \quad (5.5)$$

Modyfikacja reguły w modelu SPA–BNE w stosunku do modelu SPA polega na tym, że jeśli pieszy, który ma przesunąć się na komórkę  $c_n$  będącą wąskim gardłem, wylosuje blokadę, zgodnie z równaniem (5.4), to pozostaje w danym kroku czasowym w poprzedniej komórce. Jednocześnie komórka  $c_n$  (będąca wąskim gardłem) przyjmuje stan  $s(c_n) = 2$  i zostaje zablokowana do końca danego kroku czasowego.

Algorytm reguły przejścia podany jest poniżej, przyjmiemy, że trzy pierwsze punkty są identyczne jak w modelu SPA natomiast pozostałe kroki są odmienne:

1. Określana jest funkcja kosztu  $cost(c_k, e_x)$  dla każdego z wyjść  $e_x \in E$  wg wzoru (5.1)
2. Wybrane jest to wyjście  $e^*$ , dla którego koszt  $cost(c_k, e^*)$  jest najmniejszy.
3. Analizowany jest stan  $con_t/\eta(c_k)$  otoczenia komórki  $c_k$  i wybierana jest pusta komórka  $c_m$  przyległa do  $c_k$  i należąca do drogi  $w(c_k, e^*)$ , a jeśli nie ma takiej komórki pustej, to wybierana jest pusta komórka przyległa będąca najbliższą drogi  $w(c_k, e^*)$  w kierunku wyjścia  $e^*$ .
4. Sprawdzane jest czy docelowa komórka  $c_m$  należy do klasy  $BN$  i została dla niej wylosowana blokada.
  - Jeżeli nie, to modyfikowany jest stan komórki  $c_m$ :  $s_{t+1}(c_m) = 1$  oraz modyfikowany jest stan komórki  $c_k$ :  $s_{t+1}(c_k) = 0$ ,
  - Jeżeli tak, to stan komórki  $c_k$ :  $s_{t+1}(c_k) = 1$  pozostaje bez zmian, zaś komórka  $c_m$ :  $s_{t+1}(c_m) = 2$  przyjmuje stan „zablokowana” do końca danego kroku czasowego.

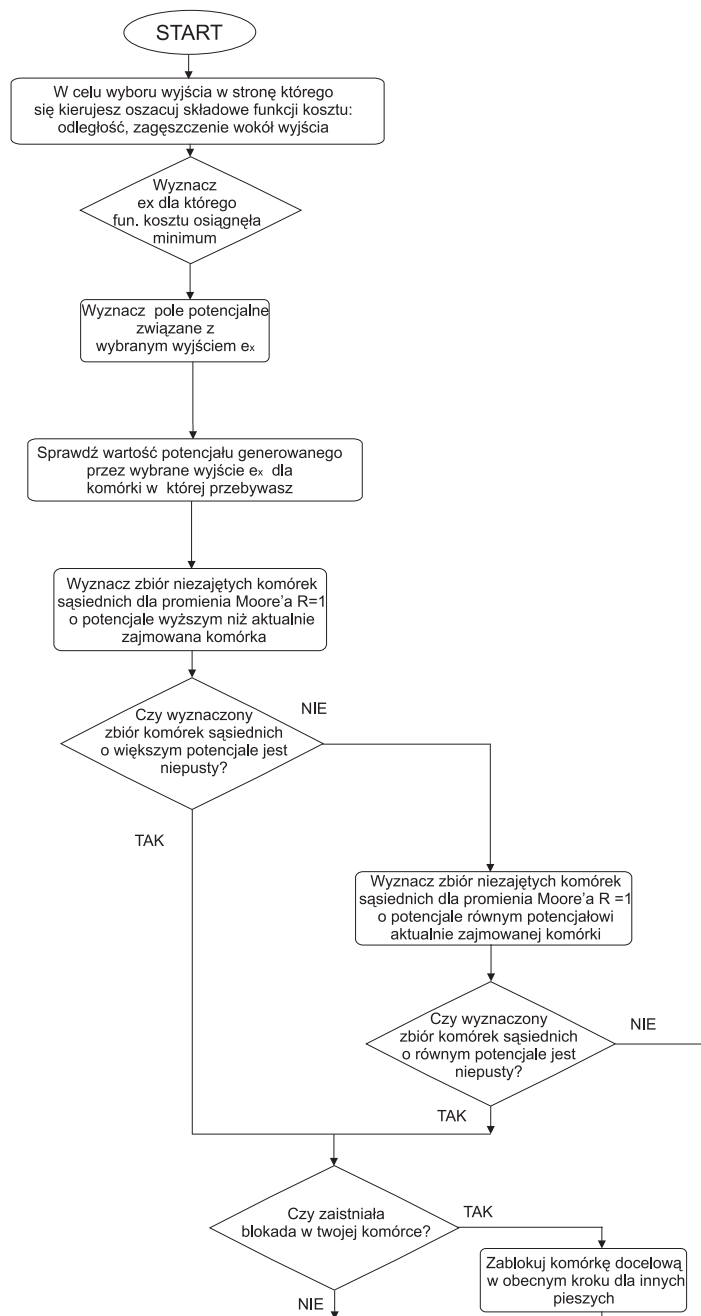
**Funkcja przejścia  $f$**  Funkcja przejścia w modelu SPA–BNE różni się jedynie regułą lokalną opisaną powyżej, natomiast kolejność przeglądania komórek pozostaje identyczna, jak w modelu SPA–BNE.

### 5.4.3 Algorytm ruchu z uwzględnieniem blokad

W początkowej części algorytm ruchu pieszego jest identyczny jak dla opisanego wcześniej modelu SPA. To oznacza, że pieszy na podstawie analizy funkcji kosztu kieruje się w stronę określonego wyjścia z pomieszczenia.

Jeżeli wyznaczona jest już kolejna komórka jako cel ruchu w danym kroku czasowym, to następnie sprawdzany jest typ tej komórki. Jeżeli komórka ta jest wąskim gardłem, to zgodnie z wyznaczonym prawdopodobieństwem ustalane jest czy wystąpiła blokada. Algorytm ruchu w tym przypadku przewiduje, że pieszy, który chce wejść na komórkę będącą wąskim gardłem, traci możliwość ruchu w danej chwili czasowej. Natomiast komórka ta zostaje zablokowana (nieдоступna) dla innych pieszych do końca danego taktu symulacji. W następnym kroku czasowym (po przeglądnięciu listy wszystkich pieszych), pieszy zyskuje możliwość ruchu, a jego komórka docelowa z poprzedniego taktu zostaje odblokowana. W kolejnym takcie następuje kolejna iteracja algorytmu dla danego pieszego.

Algorytm ruchu z uwzględnieniem mechanizmu blokad umieszczono na rysunku 5.5.



Rysunek 5.5: Algorytm ruchu pojedynczego pieszego dla modelu SPA-BNE

## Rozdział 6

# Dynamika tłumów – realizacja rzeczywistych eksperymentów

*Rozdział opisuje rzeczywiste badania procesu ewakuacyjnego, które zostały przeprowadzone przez autora z grupą studentów. Eksperymenty te były zrealizowane w celu umożliwienia walidacji zaproponowanych w pracy modeli ruchu pieszych. Poszczególne eksperymenty były przeprowadzone dla różnych założeń. Każdy z uczestników eksperymentów miał przypisany numer identyfikacyjny. Dzięki temu, przy pomocy analizy zapisu audio–video, prowadzonego równocześnie przez 3 kamery oraz analizy ankiet, śledzono i analizowano proces decyzyjny każdego z pieszych – uczestników eksperymentów. W rozdziale przedstawiono opis każdego z czterech eksperymentów: dwukrotnie przeprowadzonego eksperymentu ewakuacji w warunkach paniki, następnie eksperymentu kontrolowanej ewakuacji pomieszczenia i w końcu normalnego opuszczania pomieszczenia. Opis każdego z eksperymentów składa się z następujących części: opisu założeń i celów przedstawionych w danym eksperymencie uczestnikom, opisu wyników analizy zapisu video, analizy ankiet obrazujących kryteria procesu decyzyjnego uczestników oraz obserwacji i wniosków. W końcowej części rozdziału przedstawiono zbiorczą analizę i wnioski płynące z przeprowadzonych badań eksperymentalnych.*

### 6.1 Charakterystyka badań eksperymentalnych

Niezwykle ważnym zagadnieniem przy tworzeniu modeli zjawisk jest porównywanie wyników symulacji komputerowej modeli z wynikami uzyskanymi w rzeczywistych eksperymentach. Bezpośrednie obserwacje i eksperymenty pełnią również kluczową rolę w poszczególnych etapach budowania modelu matematycznego różnych zjawisk. Pierwsze iteracje budowy modeli przed-

stawionych w niniejszej pracy zostały przeprowadzone w oparciu o dane dostępne w literaturze oraz własne obserwacje autora. Proces budowy modelu następował jako ciąg następujących po sobie iteracji, w postaci tworzenia poszczególnych elementów modelu, a następnie sprawdzania działania modelu.

Kolejnym etapem było przeprowadzenie eksperymentów rzeczywistych, opisanych w niniejszym rozdziale, których celem była weryfikacja (walidacja) stworzonych ostatecznie modeli.

Badanym zjawiskiem był proces ewakuacji grupy ludzi z sali wykładowej z dostępnymi dwoma wyjściami. Eksperymenty były powtórzone kilkakrotnie dla różnych założeń. Pierwsze dwa eksperymenty dotyczyły opuszczania pomieszczenia w sytuacji paniki (dla różnej przepustowości wyjść). Kolejny eksperyment dotyczył kontrolowanej ewakuacji, natomiast ostatni z eksperymentów dotyczył zwyczajnego opuszczania pomieszczenia. Za każdym razem przebieg eksperymentów był rejestrowany jednocześnie przez trzy kamery video. Dodatkowo uczestnicy po przeprowadzonym eksperymencie wypełniali ankiety związane z ich procesem decyzyjnym.

### 6.1.1 Ogólny opis badań eksperymentalnych

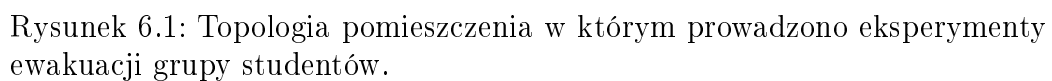
Topologia pomieszczenia w którym przeprowadzono badania eksperymentalne przedstawiona jest na rysunku 6.1. Na tymże rysunku przedstawiono również rozmieszczenie trzech kamer:  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$  filmujących przeprowadzane eksperymenty. Przy wyjściach z pomieszczenia prowadzony był pomiar czasu. Miejsca pomiaru czasu dla poszczególnych wyjść są przedstawione na rysunku 6.1 w postaci linii przerywanych zaznaczonych w drzwiach wyjściowych (opatrzonych napisem *miar czasu*).

Każdy z uczestników otrzymał kartkę z numerem identyfikacyjnym, który pozwalał na określenie początkowego miejsca pieszego w pomieszczeniu. Dzięki temu możliwe było ustalenie czasu ewakuacji, przebiegu ewakuacji oraz marszruty uczestników poprzez analizę zapisu video.

Istotnym zagadnieniem przy analizie zapisu audio–video, prowadzonej równolegle przez trzy kamery, była synchronizacja czasu. Kluczym problemem było ustalenie momentu początku ewakuacji w każdym z analizowanych filmów. Synchronizacja czasowa była możliwa, poprzez podanie sygnału dźwiękowego, oznaczającego rozpoczęcie ewakuacji, zarejestrowanego przez kamery. Dlatego też, analiza ścieżki dźwiękowej pozwoliła na precyzyjne ustalenie momentu rozpoczęcia ewakuacji w każdym, z rozpatrywanych, zapisów audio–video.

Mierzony, łączny czas ewakuacji pomieszczenia to czas uzyskany przez ostatniego użytkownika.

Nadany uczestnikom eksperymentu numer identyfikacyjny był używany



Eksperymenty ewakuacyjne składały się z następujących etapów:

- przedstawienie uczestnikom założeń danego eksperymentu symulacyjnego,
- przeprowadzenie ewakuacji z równoczesną rejestracją video,
- powrót na początkowe (wyjściowe) miejsca poszczególnych uczestników,
- wypełnienie ankiet związanych z przebiegiem eksperymentu ewakuacyjnego.

Ankiety przeprowadzono dla trzech z czterech wykonywanych eksperymentów. Zawierały one za każdym razem ten sam zestaw pytań. Poniżej przedstawiono ankietę przeprowadzoną w ramach każdego eksperymentu:

**Ankieta** dotycząca procesu decyzyjnego poszczególnych pieszych.

1. Co miało wpływ na Twoją decyzję o "trasie" ewakuacji? (Wybierz tylko jedną odpowiedź):
  - A. Wybrałem/łam drogę która wydawała mi się najszybsza
  - B. Wybrałem/łam drogę najkrótszą i konsekwentnie się tego trzymałem/łam
  - C. ....
2. Jakie szczegółowe kryteria wpłynęły na decyzję wyboru danego wyjścia? (Wybierz jedną lub więcej odpowiedzi):
  - A. Odległość od wyjścia
  - B. Zagęszczenie tłumu przy danym wyjściu
  - C. Naśladowanie innych osób
  - D. Przepustowość wyjścia
  - E. Inne (napisz jakie).....
3. Czy zmieniłem/łam decyzję o wyborze wyjścia? (Wybierz tylko jedną odpowiedź):
  - A. Nie. Kierowałem/łam się w kierunku raz wybranego wyjścia
  - B. Tak. Zmieniłem/łam decyzję 1 raz.
  - C. Tak. Zmieniłem/łam decyzję 2 razy.
  - D. Tak. Zmieniłem/łam decyzję więcej niż 2 razy.

## 6.2 Symulacja paniki – eksperyment pierwszy

W pierwszym eksperymencie każdy z uczestników dostał zadania, określone niżej przedstawionymi celami: indywidualnym oraz ogólnym.

**Cel indywidualny** : każdy uczestnik ma jak najszybciej opuścić pomieszczenie, (prowadzony będzie ranking indywidualny). Każdy indywidualnie stara się uzyskać jak najlepsze miejsce w rankingu osób opuszczających pomieszczenie.

**Cel ogólny** : Należy osiągnąć jak najlepszy czas indywidualny opuszczenia pomieszczenia.



**Założenia** : Nie wolno w sposób czynny i celowy przeszkadzać innym współuczestnikom, w trakcie ewakuacji nie można zmieniać topologii pomieszczenia (przesuwać stołów itd.). Można przemieszczać się tylko w miejscach przeznaczonych dla pieszych. Ewakuacja jest rozpoczynana równocześnie na podany sygnał.

### 6.2.1 Analiza zapisu video i ankiet

Rozpoczęcie ewakuacji zsynchronizowano na podstawie ścieżki dźwiękowej, aby możliwe było zmierzenie czasów ewakuacji i zanalizowanie wszystkich prowadzonych zapisów audio–video. W dodatku A umieszczono tabelę A.1 ukazującą ranking czasów opuszczania pomieszczenia uzyskanych przez poszczególnych uczestników eksperymentów dla symulacji paniki.

Początkowe położenie uczestników symulacji odgrywało kluczową rolę w uzyskanych czasach symulacji. Dlatego też na poniższym rysunku 6.2 ukazano czasy ewakuacji poszczególnych uczestników w odniesieniu do ich początkowego położenia. W poszczególnych kwadracikach w górnej części naniesiono nr identyfikacyjny danego pieszego, zaś w dole części przedstawiono zmierzony czas ewakuacji. Wartości czasów zaznaczone podkreśleniem oznaczają, że pieszy opuścił pomieszczenie przez przednie drzwi (widoczne w dolnej części rysunku po lewej stronie), zaś wartości czasów bez podkreślenia oznaczają, że pieszy opuścił pomieszczenie przez drzwi tylne (widoczne w górnej części rysunku również po lewej stronie).

W celu odtworzenia procesu decyzyjnego pieszych wszyscy uczestnicy wypełnili ankiety, w których pytania były zgodne z opisem w sekcji 6.1.1.

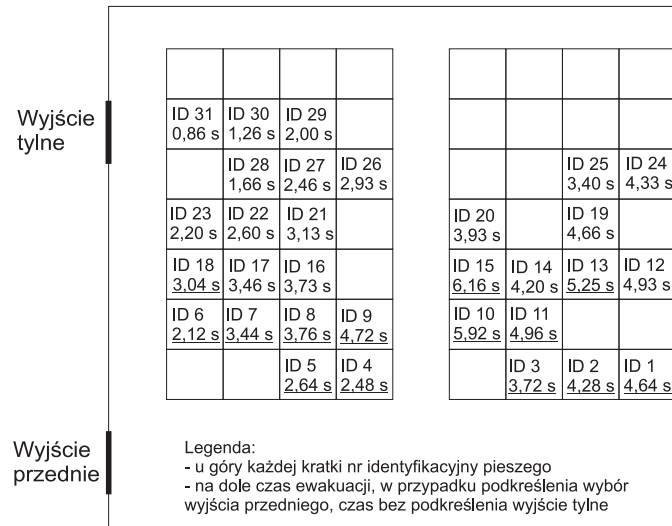
W tabeli A.5 umieszczonej w dodatku A przedstawiono odpowiedzi udzielone po przeprowadzonym eksperymencie 1 przez poszczególnych pieszych.

### 6.2.2 Podsumowanie eksperymentu pierwszego – symulacja paniki

W eksperymencie pierwszym uczestnicy dostali zadanie jak najszybszego opuszczenia pomieszczenia, gdzie liczony był ich indywidualny czas. Można było dostrzec dużą *determinację* i silne współzawodnictwo wśród uczestników. Zapis video z przebiegu tego eksperymentu wykazał kilka zderzeń i kolizji.

Czas ewakuacji pomieszczenia wyniósł: 6, 16s (liczony jako czas ostatniego pieszego).

Czasy ewakuacji przez drzwi przednie i tylne wyniosły odpowiednio: 6, 16s i 4, 93s. Z kolei w poniższej tabeli przedstawiono (procentowo) udział poszczególnych odpowiedzi w przedstawionej w sekcji 6.1.1 ankiecie.



Rysunek 6.2: Czasy ewakuacji uczestników w zależności od położenia początkowego dla symulacji paniki – eksperyment pierwszy

Podana odpowiedź	Pyt. 1	Pyt. 2	Pyt. 3
A	54,84%	90,32%	90,32%
B	38,71%	29,03%	9,68%
C	6,45%	3,23%	–
D	–	25,81%	–

Tabela 6.1: Statystyki ankiet dla symulacji paniki

Analiza ankiet w których piesi opisują swój proces decyzyjny wskazuje, że uczestnicy eksperymentów ewakuacyjnych najczęściej starali się wybierać najszybszą drogę (pytanie 1 odpowiedź A – 54,84%), zaś w drugiej kolejności drogę najkrótszą (pytanie 1 odpowiedź B – 38,71%), natomiast w 6,45 % przypadków piesi wskazali inne odpowiedzi.

Podstawowym kryterium wyboru wyjścia było oszacowanie odległości od poszczególnych wyjść (pytanie 2 odpowiedź A – 90,32 %). Kolejnym ważnym kryterium dla pieszych było zagęszczenie tłumu wokół danego wyjścia (pytanie 2 odpowiedź B – 29,03%). Następnym kryterium, które wskazywały piesi była przepustowość danego wyjścia (pytanie 2 odpowiedź D – 25,81 %). Najrzadziej wskazywanym kryterium, było kryterium naśladowania innych pieszych (pytanie 3 odpowiedź C – 3,23 %). Kryterium odległości jako jedyne kryterium w procesie decyzyjnym wskazało 41,94 % pieszych.

## 6.3 Symulacja paniki – eksperyment drugi

W drugim eksperymencie każdy z uczestników dostał identyczne zadania jak w eksperymencie pierwszym. Jedyna różnica polegała na zmniejszeniu przepustowości przedniego wyjścia (dolne wyjście patrz rysunek 6.1) poprzez zamknięcie drugiego skrzydła drzwi.

W przypadku tego eksperymentu ankieta nie była przeprowadzana.

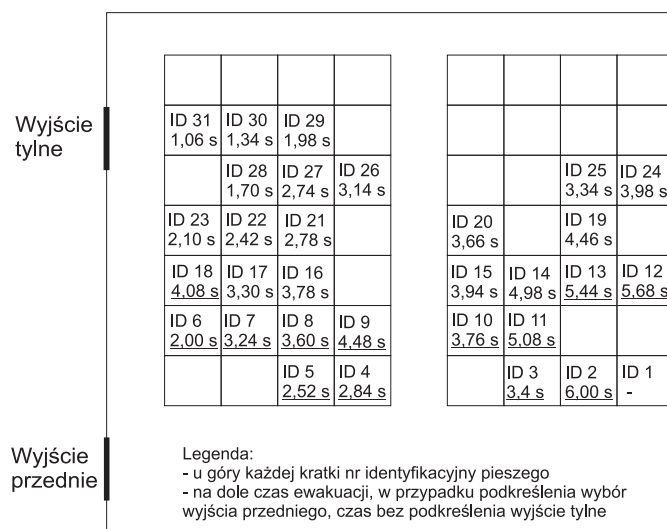
### 6.3.1 Analiza zapisu video

Rozpoczęcie ewakuacji zsynchronizowano na podstawie ścieżki dźwiękowej. W dodatku A umieszczono tabelę A.2, która ukazuje ranking czasów opuszczenia pomieszczenia, uzyskanych przez poszczególnych uczestników eksperymentu.

Z kolei na rysunku 6.3 przedstawiono zależność czasów ewakuacji od początkowej alokacji pieszych, sporządzoną na podstawie analizy video dla eksperymentu 2.

### 6.3.2 Podsumowanie eksperymentu drugiego – symulacja paniki

Eksperyment drugi przebiegał bardzo podobnie jak pierwszy. Uczestników obowiązywały te same założenia. Podczas tego eksperymentu zaszły jednak pewne nieznaczące zmiany. Pierwszą zmianą było zmniejszenie przepustowości jednych drzwi wejściowych tzn. drzwi przednich (poprzez zamknięcie jednego skrzydła). Ponadto w eksperymencie tym brał udział o jeden pieszy mniej



Rysunek 6.3: Czasy ewakuacji uczestników w zależności od położenia początkowego dla symulacji paniki – eksperyment drugi

niż w eksperymencie pierwszym. Należy wziąć pod uwagę aspekt, że ten eksperyment był wykonany jako drugi w kolejności, więc przy analizie wyników należy uwzględnić proces *uczenia się* przez pieszych postępowania przy ewakuacji.

W tym kontekście nie dziwi fakt, że pomimo zmniejszenia przepustowości jednego z wyjść, nie tylko nie pogorszył się całkowity czas ewakuacji, ale wręcz nieznacznie się poprawił.

Czas ewakuacji pomieszczenia wyniósł: 6,00s (liczony jako czas ostatniego pieszego).

Czasy ewakuacji przez drzwi przednie i tylne wyniosły odpowiednio: 6,00s i 4,98s.

## 6.4 Symulacja kontrolowanej ewakuacji – eksperyment trzeci

W trzecim eksperymencie każdy z uczestników dostał następujące zadania:

**Cel indywidualny** : Każdy uczestnik ma jak najszybciej opuścić pomieszczenie, (prowadzony będzie ranking indywidualny, ale ma on znaczenie drugorzędne).

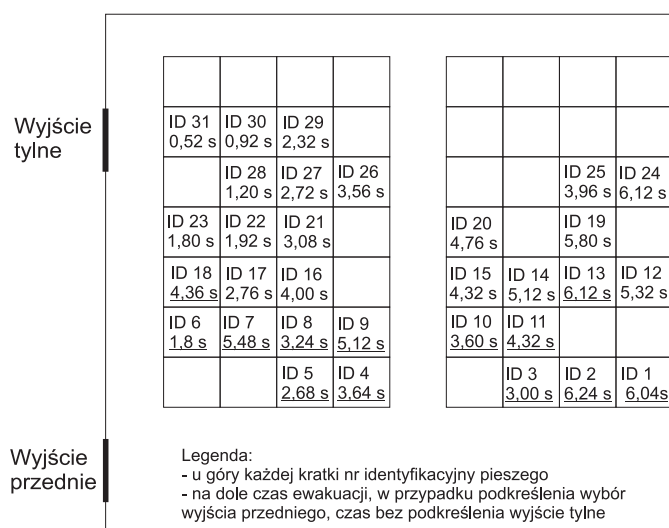
**Cel ogólny** : Grupa ma osiągnąć jak najlepszy czas ewakuacji. Indywidualny czas ma znaczenie drugorzędne.

**Założenia** : W trakcie ewakuacji nie można zmieniać topologii pomieszczenia (przesuwać stołów itd.). Można przemieszczać się tylko w miejscach przeznaczonych dla pieszych. Ewakuacja jest rozpoczynana równocześnie na podany sygnał.

### 6.4.1 Analiza zapisu video i ankiet

Rozpoczęcie początku ewakuacji zsynchronizowano na podstawie ścieżki dźwiękowej zapisu video. W tabeli A.3 umieszczonej w dodatku A przedstawiono ranking czasów opuszczania pomieszczenia uzyskanych przez poszczególnych uczestników eksperymentów.

Poniższy rysunek 6.4 przedstawia wyniki analizy video dla eksperymentu 3.



Rysunek 6.4: Czasy ewakuacji uczestników w zależności od położenia początkowego dla symulacji kontrolowanej ewakuacji.

Podobnie jak w eksperymencie pierwszym dla kontrolowanej ewakuacji przeprowadzono również ankietę zgodnie z opisem zamieszczonym w sekcji 6.1.1. Zapis wyników ankiety eksperymentu trzeciego umieszczono w dodatku A w tabeli A.6.

### 6.4.2 Podsumowanie eksperymentu trzeciego – kontrolowana ewakuacja

W eksperymencie trzecim indywidualny ranking uczestników miał drugoplanowe znaczenie. Natomiast grupa pieszych, traktowana jak całość, dostała zadanie jak najszybszego opuszczenia pomieszczenia. Zaowocowało to mniejszym indywidualnym stopniem *determinacji* uczestników. Sam proces ewakuacji przebiegał w sposób skoordynowany i składny.

Ciekawym faktem jest, że czas ewakuacji przez poszczególne wyjścia był niemal identyczny, a obydwa wyjścia były jednakowo "obciążone". Całkowity czas ewakuacji był porównywalny z dwoma pierwszymi eksperymentami. Nie obserwowano zderzeń.

Czas ewakuacji pomieszczenia wyniósł: 6, 24s (liczony jako czas ostatniego pieszego).

Czasy ewakuacji przez drzwi przednie i tylne wyniosły odpowiednio: 6, 24s i 6, 12s.

Z kolei w poniższej tabeli 6.2 przedstawiono procentowo, udział poszczególnych odpowiedzi w ankiecie opisanej w sekcji 6.1.1: Analiza przesłanek po-

Podana odpowiedź	Pyt. 1	Pyt. 2	Pyt. 3
A	51,61%	87,10%	96,77%
B	48,39%	41,94%	3,23%
C	–	12,90%	–
D	–	16,13%	–

Tabela 6.2: Statystyki analizowanych ankiet – kontrolowana ewakuacja

dejmowania decyzji, zawartych w ankietach wskazuje, że piesi biorący udział w eksperymentach, wskazywali niemal jednakowo często na wybór najszybszej drogi ewakuacji (pytanie 1, odpowiedź A wskazało 51,61% pieszych) i wybór drogi najkrótszej (pytanie 1, odpowiedź B – 48,39% wskazań).

Z kolei w pytaniu drugim ankiety, dotyczącym kryteriów decyzji wyboru drogi ewakuacji podjętych przez pieszych, najczęstszą odpowiedzią była odległość od wyjścia (odpowiedź A – 87,10%) a następnie zagęszczenie tłumu przy danym wyjściu (odpowiedź B – 41,94%). Dalej kolejnym kryterium wskazanym przez uczestników była przepustowość danego wyjścia (odpowiedź D – 16,13 %). Natomiast w procesie decyzyjnym na naśladowanie innych uczestników ewakuacji wskazało 12,90 % uczestników eksperymentów (odpowiedź C – 12,90%). Odległość jako jedyne kryterium podjętej decyzji wskazało 48,39 % uczestników.

W pytaniu trzecim dotyczącym zmian w podejmowaniu decyzji zdecydowana większość uczestników decyzję o wyborze wyjścia podjęła tylko 1 raz i już jej nie zmieniała (Odpowiedź A – 96,77%, odpowiedź B – 3,32%).

## 6.5 Sytuacja zwyczajnego opuszczania pomieszczenia – eksperyment czwarty

W czwartym eksperymencie uczestnicy otrzymali następujące zadania:

**Cel indywidualny** : Każdy uczestnik ma opuścić pomieszczenie jak w zwyczajnej sytuacji wyjścia z wykładu, (ranking nie ma znaczenia).

**Cel ogólny** : Należy oddać sytuację zwyczajnego wychodzenia z sali wykładowej, bez nadzwyczajnego pośpiechu, ale i bez zbytniego ociągania się.

**Założenia** : W trakcie ewakuacji nie można zmieniać topologii pomieszczenia (przesuwać stołów itd.). Można przemieszczać się tylko w miejscach przeznaczonych dla pieszych. Ewakuacja jest rozpoczynana równocześnie na podany sygnał. Badana jest sytuacja normalnego, zwyczajnego opuszczania pomieszczenia.

### 6.5.1 Analiza zapisu video i ankiet

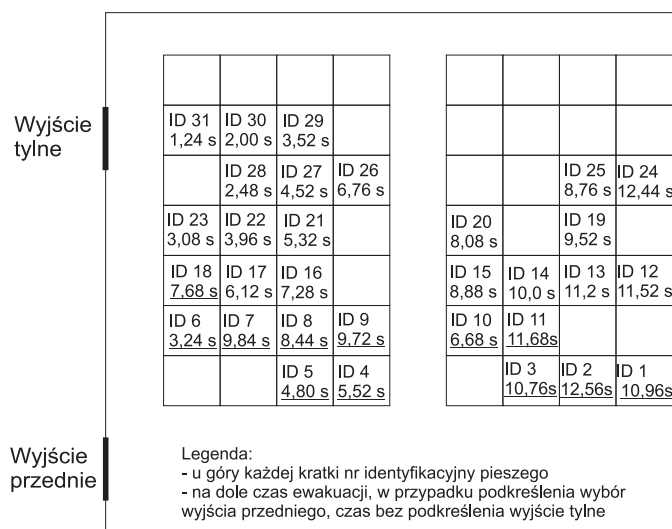
Rozpoczęcie ewakuacji zsynchronizowano na podstawie ścieżki dźwiękowej z zapisu audio–video. W tabeli A.4 umieszczonej w dodatku A zaprezentowano ranking czasów opuszczania pomieszczenia uzyskanych przez poszczególnych uczestników eksperymentów.

Z kolei poniższy rysunek 6.5 przedstawia wyniki analizy video dla eksperymentu 4.

Podobnie jak w przypadku eksperymentów 1 i 3, dla eksperymentu 4 – normalnego opuszczania pomieszczenia, przeprowadzono ankiety odzwierciedlające proces decyzyjny i jego przesłanki. Szczegółowy zakres pytań do ankiet umieszczono w sekcji 6.1.1, natomiast tabela A.7 z udzielonymi odpowiedziami została zamieszczona w dodatku A.

### 6.5.2 Podsumowanie eksperymentu czwartego – normalne opuszczanie pomieszczenia

W eksperymencie czwartym ranking czasów pieszych nie odgrywał znaczenia. Zadanie polegało bowiem na opuszczeniu pomieszczenia bez pośpiechu,





Podana odpowiedź	Pyt. 1	Pyt. 2	Pyt. 3
A	20,00%	73,33%	93,33%
B	76,67%	23,33%	6,67%
C	3,33%	26,67%	–
D	–	23,33%	–
E	–	3,33%	–

Tabela 6.3: Statystyki odpowiedzi ankiet – sytuacja normalnego opuszczania pomieszczenia

wyłączne kryterium odległości podano w 40% odpowiedzi.

Zmianę decyzji o wyborze wyjścia w trakcie procesu opuszczania pomieszczenia wskazało 6,67% uczestników (pytanie 3 odpowiedź B – 6,67%), natomiast jednokrotne podjęcie decyzji potwierdziło 93,33 % uczestników (pytanie 3 odpowiedź A – 93,33%).

## 6.6 Wnioski

Analizując dane doświadczalne można zauważyć rozmaite prawidłowości.

Dosyć oczywisty wniosek można wysnuć z analizy wszystkich czasów ewakuacji: początkowa alokacja pieszych w dużym stopniu determinuje kolejność opuszczania pomieszczenia (tabele: 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 )

Znaczne różnice w zachowaniu ludzi wystąpiły w poszczególnych eksperymentach. W szczególności jednym z ważniejszych parametrów charakterystycznych dla każdego eksperymentu był *stopień determinacji pieszych*. Duży stopień determinacji jest to rozumiany jako zdecydowane dążenie pieszego w kierunku obranego celu, gdy pozostali uczestnicy są przezeń traktowani jako konkurencja. Natomiast niski stopień determinacji oznacza brak współzawodnictwa między pieszymi.

Najwyższy stopień determinacji zaobserwowano w eksperymentach 2 i 1 tzn. dla symulacji paniki. W trakcie przebiegu eksperymentu doszło do zderzeń i przepychanek między pieszymi. Należy w tym miejscu podkreślić, że dwa pierwsze eksperymenty nie odzwierciedlają stopnia determinacji odpowiadającego prawdziwej panice. Wykonanie takich eksperymentów było niemożliwe ze względu na bezpieczeństwo uczestników. Niestety skutki tragicznych wydarzeń z udziałem tłumów ludzi prowadziły często do poważnych obrażeń ciała czy śmierci wielu ludzi.

Nieco niższy stopień determinacji obserwowano w eksperymentach 3, czyli symulacji kontrolowanej ewakuacji, gdzie ranking indywidualny miał drugo-

rzędne znaczenie, a liczył się przede wszystkim czas grupy (zespołu) pieszych. Tutaj zderzenia i blokady występowały stosunkowo rzadko i były spowodowane głównie ograniczonym indywidualnym czasem reakcji przy relatywnie dużych prędkościach uzyskiwanych przez pieszych oraz większym nastawieniem pieszych na współpracę niż rywalizację.

Z kolei najniższy stopień determinacji obserwowano w eksperymencie 4, czyli symulacji normalnego opuszczania pomieszczenia. Nie zaobserwowano żadnych zderzeń ani sytuacji współzawodnictwa.

Innym ważnym parametrem było *uporządkowanie* procesu ewakuacji. Najlepsze uporządkowanie można było obserwować w eksperymencie 4 – opuszczaniu pomieszczenia w normalnych warunkach oraz w eksperymencie 3 – symulacji kontrolowanej ewakuacji. W przypadku normalnego opuszczania pomieszczenia (eksperyment 4) nie występowały zakłócenia procesu ewakuacyjnego na skutek konfliktów. W sytuacji, gdy piesi oczekiwali przed wspomnianymi powyżej wąskimi gardłami, autor zaobserwował mechanizmy znane z sieci kolejkowych *FIFO*. Z kolei przy kontrolowanej ewakuacji, w której piesi poruszali się zdecydowanie szybciej (około dwóch razy), zakłócenia (lokalne blokady) zdarzały się stosunkowo rzadko.

Uporządkowanie procesu ewakuacji zostaje zaburzone w sytuacji paniki. Wówczas każda sytuacja konfliktowa staje się potencjalnym zagrożeniem dla bezpieczeństwa ludzi i płynności procesu ewakuacji. W filmie z przebiegiem symulacji paniki (eksperymenty 1 i 2) obserwuje się przepychanie i zderzenia (szczególnie w miejscach będących wąskimi gardłami w pomieszczeniu).

Na podstawie analizy przeprowadzonych ankiet możemy rozpatrywać kolejne prawidłowości ruchu pieszych. Wraz ze spadkiem *determinacji* pieszych obserwuje się częstszy wybór drogi najkrótszej, zamiast drogi najszybszej. Wybór drogi najszybszej, dla symulacji paniki, kontrolowanej ewakuacji i sytuacji normalnej, wskazało odpowiednio: 54,84%; 51,61%; 20,00% uczestników (pytanie 1 ankiety).

Podobnie wraz ze spadkiem stopnia determinacji można zaobserwować zmiany wśród kryteriów dotyczących wyboru wyjścia (pytanie 2 ankiety). Statystyki istotności kryteriów zamieszczono w tabeli 6.4

W przypadku symulacji paniki, kryterium odległości zostało wskazane w 90,32% odpowiedzi, natomiast jako jedyne kryterium w procesie decyzyjnym zostało wskazane przez 41,90% uczestników. W eksperymencie kontrolowanej ewakuacji kryterium odległości zostało wskazane przez 87,10% uczestników, natomiast jako jedyne zostało wskazane przez 48,39% pieszych. W sytuacji normalnego opuszczania pomieszczenia odległość została wskazana przez 73,33 % uczestników, zaś jako jedyne kryterium podjęcia decyzji o kierunku ewakuacji 40% pieszych. W przeprowadzonych eksperymentach zaobserwowano więc spadek istotności kryterium odległości. Kryterium odległości

	Odległość	Zagęszczenie wokół wyjść	Naśladowanie innych	Przepustowość wyjścia
Symulacja paniki	90,32%	29,03%	3,23%	25,81 %
Kontrolowana ewakuacja	87,10%	41,94%	12,90%	16,13%
Normalne opuszcz. sali	73,33%	23,33%	26,67%	23,33 %

Tabela 6.4: Kryteria wyboru wyjść dla poszczególnych sytuacji – dane z ankiet

traktowane jako *jedyne*, osiągnęło największą wartość w przypadku kontrolowanej ewakuacji. Z kolei kryterium zagęszczenia przy danym wyjściu było wskazywane najczęściej w przypadku kontrolowanej ewakuacji, zaś najmniejszą wartość osiągnęło w przypadku normalnego opuszczania pomieszczenia.

Wraz ze spadkiem stopnia determinacji możemy obserwować wzrost tendencji do naśladowania innych pieszych (odpowiednio 3,23%; 12,90% i 26,67% odpowiedzi).

Kryterium przepustowości wyjść miało największe znaczenie w symulacji paniki 25,81%, następnie w normalnym opuszczaniu pomieszczenia 23,33% odpowiedzi, zaś najmniejsze znaczenie tego kryterium wskazano w symulacji kontrolowanej ewakuacji 16,13%.

Kolejnym parametrem były czasy ewakuacji dla poszczególnych eksperymentów. W poniższej tabeli 6.5 przedstawiono czasy, dla poszczególnych wyjść, natomiast wytłuszczonym drukiem zaznaczono całkowite czasy ewakuacji. W poniższej tabeli przedstawiono również stosunek czasów ewakuacji przedniego i tylnego wyjścia z pomieszczenia przeliczony na procenty.

Numer eksperymentu	Czas wyjście przednie	Czas wyjście tylne	Stosunek czasów przód/tył
1	<b>6,16</b>	4,93	80,03 %
2	<b>6,00</b>	4,98	83,00 %
3	<b>6,24</b>	6,12	98,08 %
4	<b>12,56</b>	12,44	99,04 %

Tabela 6.5: Czasy ewakuacji dla poszczególnych eksperymentów. Tłustym drukiem zaznaczono całkowite czasy ewakuacji.

W trzech pierwszych eksperymentach (symulacje paniki i kontrolowanej

ewakuacji) łączne czasy ewakuacji były bardzo podobne. Natomiast przy normalnym opuszczaniu pomieszczenia piesi uzyskali dwukrotnie dłuższy całkowity czas ewakuacji niż w pierwszych trzech eksperymentach.

Ostatnia kolumna tabeli 6.5 opisuje procentową różnicę stosunków czasów ewakuacji przedniego i tylnego wyjścia, która może być też rozpatrywana jako miara wykorzystania zasobów ewakuacji. Widać, że wyjścia były zdecydowanie lepiej wykorzystane dla symulacji kontrolowanej ewakuacji niż symulacji paniki. Dziwić może niewielka różnica całkowitych czasów ewakuacji przez poszczególne wyjścia dla sytuacji normalnej. Wytłumaczeniem może być tu fakt, że eksperyment ten został wykonywany jako ostatni i uczestnicy nauczyli się już optymalnie używać zasobów ewakuacyjnych.

## Rozdział 7

# Implementacja i badania symulacyjne

*W rozdziale tym zaprezentowano badania symulacyjne modeli dynamiki pieszych zaproponowanych w niniejszej pracy. W pierwszej części opisano aplikację „Piesi”, która została stworzona celem implementacji zaproponowanych modeli. W ramach opisu przedstawiono przyjęte założenia oraz wewnętrzną strukturę tejże aplikacji. Następnie opisano graficzny interfejs użytkownika wraz z zakresem funkcjonalności programu. W kolejnej części rozdziału zaprezentowano symulacje komputerowe modeli dedykowanych dla poszczególnych sytuacji. Dla sytuacji normalnego opuszczania pomieszczenia zastosowano zaproponowany model SPA, natomiast dla sytuacji kontrolowanej ewakuacji oraz dla sytuacji paniki model SPA-BNE. Dla każdej z rozpatrywanych sytuacji przeprowadzono również symulacje przy zastosowaniu modelu bazowego. Następnie przeprowadzono dyskusję uzyskanych wyników w porównaniu z danymi rzeczywistymi zaprezentowanymi w rozdziale szóstym, literaturą oraz obserwacjami autora.*

### 7.1 Implementacja modeli – opis aplikacji

#### 7.1.1 Informacje ogólne

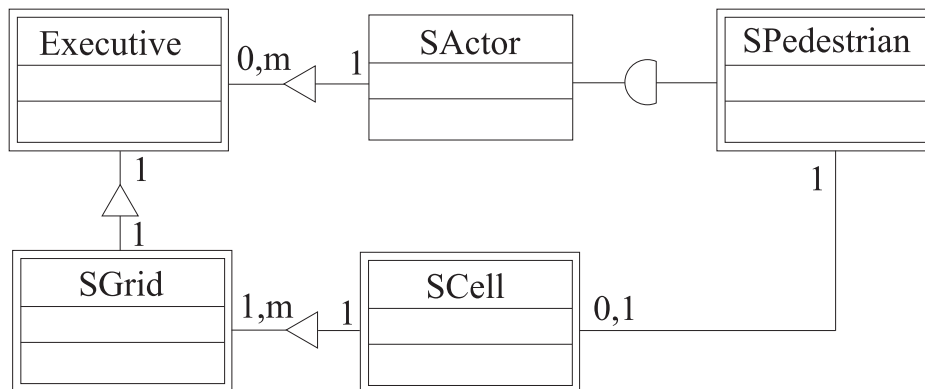
W rozdziale 5 autor zaproponował algorytmy modelujące inteligentne zachowania w dynamice pieszych. Wszystkie te modele zostały zaimplementowane w języku C++ [Grę99, Str02], jako aplikacja Microsoft Visual C++ 6.0 [BT99]. Program symulacyjny został napisany do pracy pod kontrolą systemu Windows 2000/XP. Interfejs użytkownika został stworzony w oparciu o bibliotekę MFC (Microsoft Foundation Classes).

Program symulacyjny posiada trójwarstwową strukturę określoną przez metodologię procesów dyskretnych [Pid94, WG04]:

- podstawową warstwą w programie jest koordynator (*ang. executive*), czyli moduł który jest odpowiedzialny za sterowanie procesem symulacji,
- warstwa główna jest stworzona poprzez szczegółowe procedury obsługi zdarzeń i interakcji między poszczególnymi elementami modelu,
- warstwa usługowa, którą stanowią klasy i procedury odpowiedzialne za wizualizację, akwizycję danych, losowanie itd.

### 7.1.2 Opis struktury wewnętrznej aplikacji

Na poniższym rysunku 7.1 przedstawiono schemat Coad–Yourdona [CY94a, CY94b] dla klasy SModel, która stanowi najważniejszą część aplikacji „Piesi”. Objaśnienia schematu zamieszczono pod rysunkiem.



Rysunek 7.1: Struktura głównej części aplikacji „Piesi” przedstawiona wg schematu Coad–Yourdona

Klasa SModel jest złożona z następujących elementów składowych:

- koordynator (*ang. executive*) sterujący procesem symulacji, do modelu przypisanych jest 0 do  $m$  aktorów (pierwowzorów pieszego) z klasy abstrakcyjnej SActor, która jest klasą bazową dla pieszych. Do koordynatora przypisana jest również jedna siatka–obiekt klasy SGrid,
- model siatki zamieszczony w klasie SGrid (zawierającej informacje o siatce w modelu tzn. wysokości i szerokości siatki), do klasy SGrid są

przypisane poszczególne komórki siatki jako obiekty SCell. Do jednej siatki jest przypisanych od 1 do  $m$  komórek,

- zbiór cel modelu reprezentowany w klasie SCell, poszczególne cele przynależą do siatki,
- zbiór pieszych reprezentowany w klasie SPedestrian, poszczególne obiekty są dziedziczone z klasy abstrakcyjnej SActor, natomiast każdy pieszy jest przypisany do pojedynczej celi SCell
- klasa abstrakcyjna SActor jest otwartym elementem architektury aplikacji, na bazie którego będzie można tworzyć pieszych-agentów o różnych, zdefiniowanych możliwościach.

Poszczególne cele siatki są opisane poprzez: współrzędne położenia celi na siatce, stan danej komórki oraz typ komórki. Typ komórki odpowiada przynależności do zbioru elementów: celi z przestrzeni ruchu, wyjścia, mur, przeszkoda. Komórki należące do przestrzeni ruchu  $MS$  mogą przyjmować stan: „wolna”–0 lub „zajęta”–1, jeśli natomiast dana komórka należy do podzbioru wąskie gardło, to może przyjąć stan „zablokowana”–2. Poszczególni piesi są opisywani poprzez parametry: numer identyfikacyjny, kierunek ruchu oraz aktualny cel.

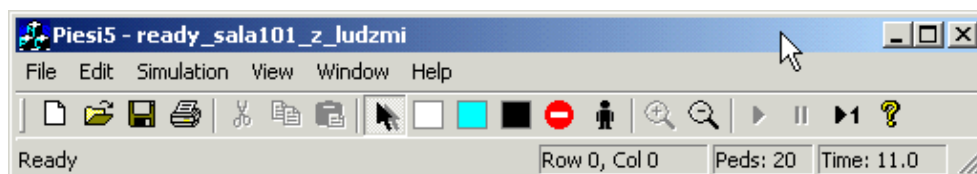
W modelu testowano różne warianty ustalania kolejności przeglądania i wykonywania ruchów przez poszczególnych pieszych. Autor zaproponował, między innymi, *metodę rozchodzącej się fali*, w której piesi szeregowani są na liście priorytetowej poczynawszy od tych usytuowanych najbliżej wyjścia, w kierunku środka pomieszczenia. Natomiast w przypadku pieszych usytuowanych najbliżej wyjścia pierwszeństwo mają dłużej oczekujący. Lista priorytetowa porządkuje kolejność ruchu pieszych w zależności od odległości oraz czasu oczekiwania. Piesi, którzy osiągną wyjście są usuwani z systemu, natomiast zajmowane przez nich poprzednio miejsca zajmują następni piesi w kolejnych krokach czasowych.

### 7.1.3 Graficzny interfejs użytkownika – opis

Menu główne aplikacji *Piesi*, widoczne na rysunku 7.2, składa się z następujących elementów:

1. File
2. Edit
3. Simulation

4. View
5. Window
6. Help



Rysunek 7.2: Główne menu aplikacji „Piesi”

Każdy z elementów menu głównego składa się z wyszczególnionych poniżej opcji.

1. Opcje z pozycji *File* z menu głównego aplikacji:

- opcja *New* – rozpoczęcie pracy z nowym modelem dynamiki pieszych
- opcja *Open* – otworzenie zapisanego wcześniej modelu
- opcja *Close* – zamknięcie bieżącego modelu
- opcja *Save* – zapisanie modelu w pliku z domyślnie ustawioną nazwą i ścieżką dostępu
- opcja *Save as* – zapisanie modelu w nowym pliku z podaniem nazwy i ścieżki dostępu
- opcja *Export statistics* – zapisanie statystyk symulacji w pliku tekstowym \*.csv (z danymi pooddzielanymi średnikami). Statystyki te obejmują czasy ewakuacji poszczególnych pieszych, współrzędne ostatecznie wybranego wyjścia, ogólny czas ewakuacji, czasy ewakuacji poszczególnych wyjść
- opcja *Print* – wydrukowanie zawartości okna głównego
- opcja *Print Preview* – prezentacja podglądu wydruku
- opcja *Print Setup* – ustawienie parametrów wydruku
- zestawienie ostatnio otwartych modeli
- opcja *Exit* – wyjście z programu



2. Opcje z pozycji *Edit* z menu głównego aplikacji obejmują:

- standardowe operacje edycyjne *Undo*, *Copy*, *Cut*, *Paste*
- opcja *Tool* – wskazanie i edycja komórek siatki automatu. Po szczególne operacje edycyjne wymieniono poniżej:
  - *Selector* – wskazanie komórki w celu uzyskania jej współrzędnych
  - *Path* – przekształcenie wskazanej komórki w komórkę reprezentującą przestrzeń ruchu *Movement Space*
  - *Decision point* – przekształcenie wskazanej komórki w komórkę reprezentującą wyjście z pomieszczenia
  - *Wall* – przekształcenie wskazanej komórki w komórkę reprezentującą ścianę lub przeszkodę

3. Opcje z pozycji *Simulation* z menu głównego aplikacji przedstawiają się następująco:

- opcja *Autogenerate pedestrians* – losowa alokacja wskazanej liczby pieszych na siatce
- opcja *Refresh potential field* – ręczna aktualizacja pól potencjalnych modelu
- opcja *Reset counters* – wyzerowanie liczników symulacji
- opcja *Parameters* – ustawienie parametrów modelu
  - *Radius of Moore neighbourhood* – wskazanie promienia sąsiedztwa Moore’a do funkcji kosztu obliczającej decyzje, dotyczące wyboru wyjścia przez pieszego
  - *Blocking probability weight* – ustawienie globalnego współczynnika prawdopodobieństwa blokady w wąskich gardłach
  - *Weight  $w_d$*  – wskazanie wagi odległości do funkcji kosztu obliczającej decyzje związanej z wyborem wyjścia przez pieszego
  - *Weight  $w_g$*  – wskazanie wagi gęstości do funkcji kosztu obliczającej decyzje związane z wyborem wyjścia przez pieszego
- opcja *Start* – rozpoczęcie działania symulacji
- opcja *Pause* – wstrzymanie działania symulacji
- opcja *Stop* – zakończenie działania symulacji
- opcja *Reset simulation* – usunięcie z siatki pieszych, ich statystyk oraz wyzerowanie liczników symulacji

4. Opcje z pozycji *View* z menu głównego aplikacji przedstawiają się następująco:
  - opcja *Toolbar* – włączenie/wyłączenie paska narzędzi
  - opcja *Statusbar* – włączenie/wyłączenie paska statusu
  - opcja *Appearance* – ustawienie barwy dla komórek symulacji: wyjść, przestrzeni ruchu, ścian, wąskich gardeł, pieszych oraz pieszych zablokowanych.
5. Opcje z pozycji *Window* z menu głównego aplikacji składają się ze standardowych opcji obsługi okienek: *New Window*, *Cascade*, *Tile*
6. Opcje z pozycji *Help* z menu głównego aplikacji zawiera podstawowe informacje o programie

Ponadto podczas działania programu w dodatkowym oknie widoczne są bieżące statystyki dotyczące poszczególnych pieszych reprezentowanych w programie.

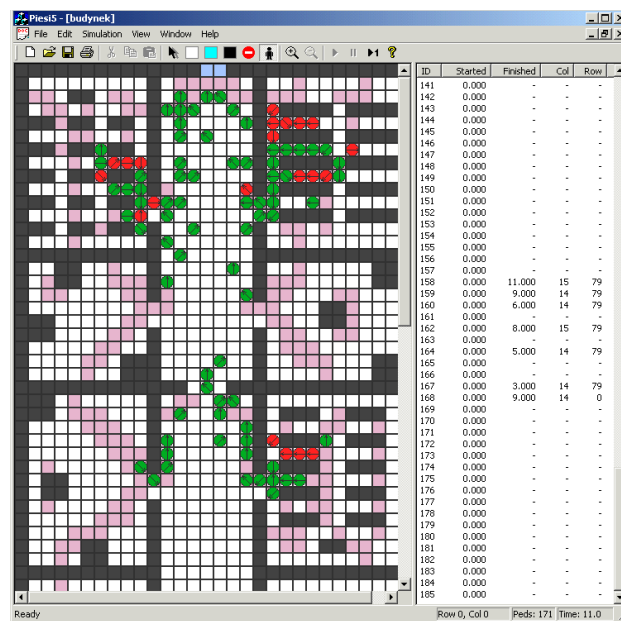
Przykładowa symulacja sytuacji ewakuacyjnej została ukazana na rysunkach 7.3 oraz 7.4. Na rysunkach pola oznaczone kolorem czarnym reprezentują ściany i przeszkody. Pola niebieskie oznaczają wyjścia. Pola różowe oznaczają potencjalne wąskie gardła (mniej dostępnych „wyjść” z pola, niż „wejść” na to pole). Dostępne statystyki pieszych są widoczne w okienku po prawej stronie.

## 7.2 Symulacje komputerowe

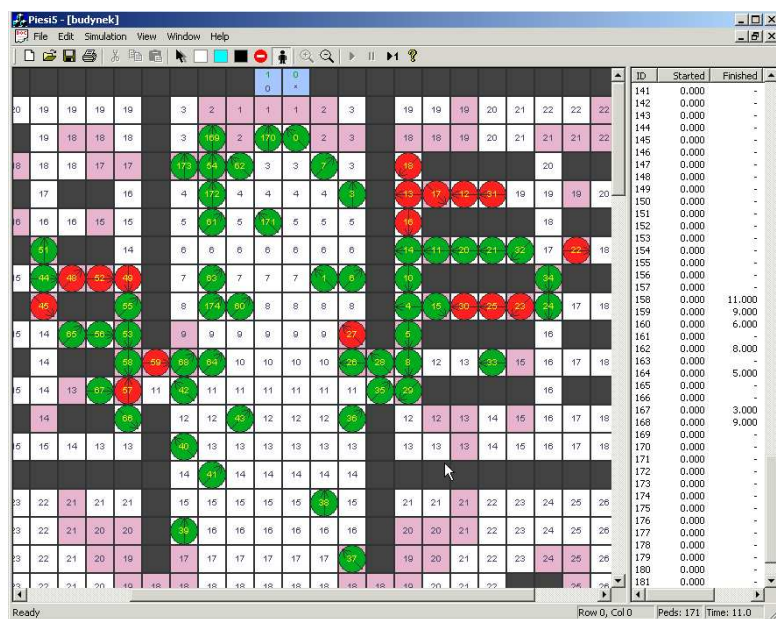
### 7.2.1 Informacje wstępne

Dla wszystkich modeli zaprezentowanych w niniejszej pracy przeprowadzono badania symulacyjne. Proces implementacji każdego modelu symulacyjnego uwzględniał następujące etapy: dobór modelu, kalibracja parametrów oraz walidacja modelu.

**Dobór modelu** W niniejszej pracy zaproponowano kilka modeli związanych z symulacją dynamiki pieszych, które są dedykowane dla różnych sytuacji. Dokładny opis proponowanych modeli zamieszczono w rozdziale 5. O doborze odpowiedniego modelu do symulowanego zjawiska decydowała charakterystyka zachowań pieszych w danej sytuacji.



Rysunek 7.3: Ewakuacja budynku – okno główne aplikacji.



Rysunek 7.4: Aplikacja – widok z widocznym polem potencjalnym oraz numerami identyfikacyjnymi pieszych.

**Kalibracja modeli** Kalibracja modelu za [Bla99] oznacza: *proces wyboru wartości i parametrów obliczeniowych modelu w celu umożliwienia poprawnego reprezentowania analizowanej rzeczywistej sytuacji czy zjawiska przez dany model.*

W celu przeprowadzenia kalibracji modelu posłużono się danymi pochodzącymi z literatury oraz przeprowadzono zestaw dodatkowych eksperymentów.

**Walidacja modeli** Po skonstruowaniu modelu symulacyjnego w postaci aplikacji oraz po uzyskaniu danych eksperymentalnych, możliwe było przeprowadzenie jego walidacji. Norma *ISO TR 13387* [ISO] dotycząca programów symulacyjnych z zakresu ewakuacji przewiduje następujące kroki walidacji modelu:

- testowanie komponentów programu – sprawdzenie poprawności poszczególnych elementów programu,
- walidacja funkcjonalna – zbadanie zakresu funkcjonalności modelu i przyjętych założeń,
- weryfikacja jakościowa – porównanie rzeczywistych, zachowań ludzi z zachowaniami obserwowanymi podczas działania aplikacji,
- weryfikacja ilościowa – weryfikacja parametrów uzyskanych w modelu z danymi rzeczywistymi.

W ramach prowadzonych badań przeprowadzono czynności walidacyjne zgodnie z wyżej wymienioną normą *ISO TR 13387* [ISO]. Dla każdego modelu od początku procesu implementacji testowane były poszczególne elementy programu, a następnie sprawdzona była funkcjonalność modelu. Następnie na podstawie obserwacji zachowania ludzi w różnych sytuacjach, przeprowadzono analizę jakościową. W końcu przeprowadzano analizę ilościową, która była realizowana w odniesieniu do wyników uzyskanych podczas eksperymentów rzeczywistych.

W poniższym opisie, dla każdej z rozpatrywanych sytuacji (dla poszczególnych modeli), umieszczono opis analizy jakościowej oraz ilościowej.

### 7.2.2 Symulacja kontrolowanej ewakuacji

W niniejszej sekcji opisano wyniki symulacji kontrolowanej ewakuacji dla modelu SPA-BNE (dedykowanego dla tej sytuacji) oraz porównawczo, dla modelu bazowego. Zasadniczym powodem przeznaczenia modelu SPA-BNE

do procesu ewakuacyjnego jest charakter modelowanego zjawiska. W procesie kontrolowanej ewakuacji konieczne jest uwzględnienie zdolności strategicznych pieszych. Jednocześnie należy uwzględnić ryzyko lokalnych zaburzeń płynności procesu ewakuacyjnego spowodowane różnymi czynnikami. W związku z dwiema wymienionymi wyżej przesłankami zdecydowano się więc zastosować model SPA–BNE do symulacji kontrolowanej ewakuacji. Należy zwrócić uwagę, że globalne prawdopodobieństwo wystąpienia blokad (uwzględnione w równaniu 5.4), które określa powstawanie blokad, jest zdecydowanie niższe dla symulacji kontrolowanej ewakuacji, niż dla sytuacji paniki. Przyjęto, że dla kontrolowanej ewakuacji współczynnik globalnego prawdopodobieństwa blokad  $p_{glob}$  (z równania 5.4) przyjmuje wartość z zakresu 0,1–0,2. W prowadzonych symulacjach przyjęto zakres wagi odległości w funkcji kosztu (równanie 5.1):  $w_d \in < 0,8; 0,9 >$ , z kolei zakres wagi gęstości:  $w_g \in (0,1; 0,2 >$ .

Ze względu na elementy algorytmu ruchu zależne od zmiennej losowej, wszystkie symulacje zostały powtórzone wielokrotnie.

### Analiza ilościowa wyników symulacji

Dla sytuacji kontrolowanej ewakuacji symulacje komputerowe przeprowadzono dla podanych niżej wartości parametrów modelu. Wartość wagi odległości przyjęto  $w_d = 0,8$ , zaś wartość wagi zagęszczenia wokół wyjść przyjęto  $w_g = 0,2$ , gdzie gęstość wyznaczano dla promienia Moore’a  $R = 3$ . Natomiast współczynnik globalnego prawdopodobieństwa blokad  $p_{glob}$  przyjęto 0,2.

Zestawienie najważniejszych danych z przebiegu symulacji komputerowej w odniesieniu do eksperymentów rzeczywistych przedstawiono w poniższej tabeli 7.1:

Porównując wyniki rzeczywistych eksperymentów oraz wyniki z modelu SPA–BNE, możemy dostrzec dużą zgodność całkowitych czasów ewakuacji oraz czasów ewakuacji dla poszczególnych wyjść. Nieco większa różnica występuje w wynikach dla modelu bazowego (szczególnie w czasie ewakuacji dla przedniego wyjścia). Z kolei rozpatrując parametr liczby ludzi wybierających poszczególne wyjścia, można stwierdzić większą zgodność z badaniami rzeczywistymi dla modelu SPA–BNE, niż dla modelu bazowego.

W tabeli A.8 przedstawiono rankingi czasów uzyskanych przez pieszych w rzeczywistych eksperymentach i symulacji komputerowej dla sytuacji kontrolowanej ewakuacji. Analizując tabelę wyników dla badań eksperymentalnych oraz symulacji komputerowej modelu SPA–BNE, można zaobserwować zależność w którym czas ewakuacji poszczególnych pieszych rośnie wraz z odległością od wyjść. W modelu SPA kolejność przeglądania komórek była jednorazowo ustalona przed rozpoczęciem symulacji, stąd w poszczególnych

	dane eksperym	m. bazowy	m. SPA-BNE
Liczba osób	31	31	31
Liczba powtórzeń	1	10	10
Całk. czas ewak.[s]	6,24	6,44	6,19
<i>Wyjście tylne</i>			
Liczba osób	18	20	17
Czas ewakuacji[s]	6,12	6,44	5,96
<i>Wyjście przednie</i>			
Liczba osób	13	11	14
Czas ewakuacji[s]	6,24	4,76	6,05

Tabela 7.1: Zestawienie najważniejszych parametrów i wyników symulacji dla sytuacji kontrolowanej ewakuacji pomieszczenia w oparciu o modele symulacyjne i dane eksperymentalne

przebiegach symulacji można zaobserwować odchylenia od tej prawidłowości. Należy podkreślić, że dane uzyskane w rzeczywistych eksperymentach mają charakter statystyczny.

### Analiza jakościowa wyników symulacji

Podczas symulowanego procesu kontrolowanej ewakuacji możemy obserwować efekty analizy sytuacji i procesu wyboru wyjść. Piesi oceniając odległość i zagęszczenie wokół wyjść podejmują decyzję o kierunku ruchu. W sytuacji kontrolowanej ewakuacji przyjęto dla funkcji kosztu wartość wagi odległości  $w_d = 0,8$ , z kolei waga gęstości przyjęła wartość  $w_g = 0,2$ . Stąd symulacji kontrolowanej ewakuacji możemy obserwować największe, wśród wszystkich symulacji, wyrównanie liczby pieszych wychodzących danym wyjściem. Fakt ten został potwierdzony rzeczywistymi eksperymentami (opisanymi w poprzednim rozdziale). Generalnie, podczas symulacji komputerowej, ruch odbywa się w sposób płynny i uporządkowany, chociaż w miejscach siatki, które stanowią wąskie gardła, dochodzi czasami do lokalnych zaburzeń płynności ruchu (blokad).

### 7.2.3 Symulacja sytuacji normalnej

Modelem dedykowanym dla symulacji sytuacji normalnej jest model SPA. Analiza zachowań ludzi wykazuje, że piesi podczas zwyczajnego opuszczania pomieszczenia wybierają zazwyczaj jak najkrótszą drogę, stąd widać, że kryterium odległości w funkcji kosztu będzie miało tu kluczowe znaczenie. W

związku z tym dla modelu SPA dla sytuacji normalnej przyjęto zakres wagi odległości w funkcji kosztu (równanie 5.1)  $w_d \in < 0,9; 1 >$ , z kolei zakres wagi gęstości  $w_g \in < 0; 0,1 >$ .

Dla porównania zestawiono wyniki działania modelu bazowego (w którym piesi wybierają wyjścia kierując się wyłącznie odległością). Symulacje dla modelu bazowego oraz SPA zostały przeprowadzone wielokrotnie, bowiem modele te bazują na algorytmach zawierających elementy zależne od zmiennej losowej.

### Analiza ilościowa wyników symulacji

Do symulacji komputerowej sytuacji normalnej przyjęto wartość wagi odległości  $w_d = 0,92$  i wartość wagi zagęszczenia wokół wyjść  $w_g = 0,08$ , gdzie gęstość wyznaczana jest dla promienia Moore'a  $R = 3$ .

Zestawienie najważniejszych danych porównawczych przedstawiono w poniższej tabeli 7.2:

	dane rzeczywiste	m. bazowy	m. SPA
Liczba osób	31	31	31
Liczba powtórzeń	1	10	10
Całk. czas ewakuacji[s]	12,56	12,88	12,32
<i>Wyjście tylne</i>			
Liczba osób	19	20	19
Czas ewakuacji[s]	12,44	12,88	12,32
<i>Wyjście przednie</i>			
Liczba osób	12	11	12
Czas ewakuacji[s]	12,56	9,52	10,08

Tabela 7.2: Zestawienie najważniejszych parametrów i wyników symulacji dla sytuacji normalnego opuszczania pomieszczenia w oparciu o dane rzeczywiste i modele symulacyjne

Analizując dane zamieszczone w tabeli 7.2, można zaobserwować, że liczba osób wybierających poszczególne wyjścia (przednie i tylne) jest zgodna dla modelu SPA oraz danych eksperymentalnych. Z kolei dla modelu bazowego istnieje niewielka różnica w stosunku do danych eksperymentalnych. Dla obydwu modeli: bazowego oraz SPA istnieje zgodność całkowitych czasów ewakuacji z wynikami rzeczywistymi. Różnica, którą można zaobserwować między wynikami z modeli symulacyjnych: bazowego i SPA oraz eksperymentami rzeczywistymi to rozbieżność czasów dla przedniego wyjścia. Różnicę tę można wytłumaczyć specyfiką przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Mianowicie eksperyment dla sytuacji normalnej przeprowadzono w ostatniej kolejności. Można więc domniemywać, że w ciągu kolejnych eksperymentów piesi nauczyli się kontrolowania bieżącej sytuacji i podejmowania decyzji, stąd nie dziwi sytuacja w której czasy ewakuacji dla poszczególnych wyjść uległy wyrównaniu. Autor stawia hipotezę, że bez prowadzonych ćwiczeń ewakuacyjnych z daną grupą ludzi, model SPA (dla wysokiej wartości wagi odległości) da dystrybucję ludzi zbliżoną do rzeczywistości.

Z kolei w tabeli A.9 przedstawiono rankingi: czasów uzyskane przez pieszych w rzeczywistych badaniach oraz średnich czasów uzyskanych w programach dla modeli bazowego i SPA. Analiza rankingów danych rzeczywistych oraz modeli symulacyjnych wskazuje na zależność uzyskanych czasów od odległości poszczególnych pieszych od wyjścia. Istnieje duże podobieństwo w rankingach pieszych uzyskanych podczas eksperymentów, i symulacji związanych z modelem SPA. Wiąże się to z kolejnością przeglądania komórek w modelu SPA, która odbywa się od wyjść włąb pomieszczenia metodą rozchodzącej się fali. Natomiast w modelu bazowym występują zaburzenia w poszczególnych przebiegach symulacji związanych z kolejnością aktualizacji komórek związanych z „ustawioną statycznie” listą pieszych.

### Analiza jakościowa

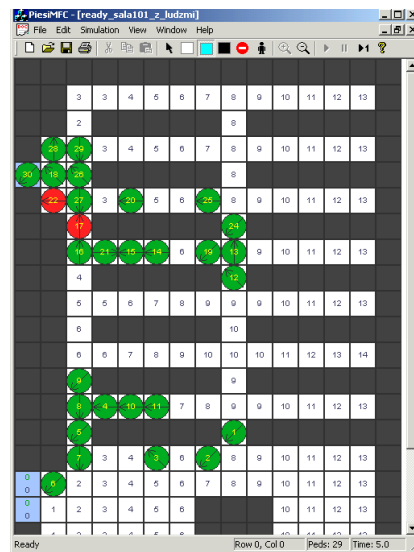
Na rysunku 7.5 przedstawiono charakterystyczny obraz symulacji w oparciu o model bazowy.

Zgodnie z wartościami potencjałów określających odległość większość pieszych kieruje się w stronę „tylnego” wyjścia. W tym modelu pieszych nie ma możliwości odwzorowania inteligentnych decyzji i zmiany wyboru wyjścia.

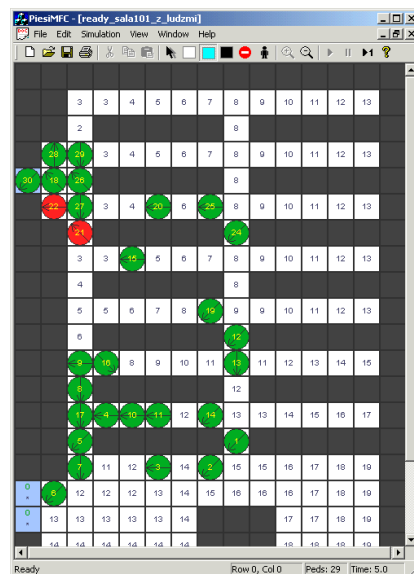
Z kolei na rysunku 7.6 przedstawiono charakterystyczny obraz dla modelu SPA.

Dla sytuacji ewakuacyjnej piesi w symulacji komputerowej poszukują najkrótszej drogi z pomieszczenia. Wiąże się to z tym, że dla modelu bazowego jedynym kryterium wyboru wyjścia jest wyłącznie kryterium odległości, z kolei dla modelu SPA przyjęta waga kryterium odległości  $w_d = 0,92$ , zdecydowanie przeważa nad wagą kryterium gęstości  $w_g = 0,08$ . Opuszczanie pomieszczenia odbywa się w modelu SPA na podobieństwo systemu kolejkowego *FIFO*. Nie zachodzą tu żadne przesłanki związane z lokalnymi blokadami (które są wynikiem rywalizacji między pieszymi). Dlatego też w symulacji komputerowej i w badaniach eksperymentalnych nie obserwujemy rywalizacji pomiędzy poszczególnymi pieszymi.





Rysunek 7.5: Typowy obraz ewakuacji dla modelu bazowego, piesi zmierzają do wyjść kierując się jedynie odległością.



Rysunek 7.6: Charakterystyczna dla modelu SPA sytuacja – piesi na bieżąco analizują sytuację. Można zaobserwować równomierne „obciążenie” obydwu wyjść.

### 7.2.4 Symulacja paniki

Symulacja paniki dotyczy sytuacji ewakuacji, w której piesi współzawodniczą, konkurując ze sobą. Dedykowanym modelem dla symulacji paniki jest model SPA–BNE. Z kolei dla celów porównawczych wszystkie symulacje przeprowadzono również dla modelu bazowego. Stopień determinacji pieszych jest w modelu SPA–BNE określany za pomocą globalnego prawdopodobieństwa blokady  $p_{glob}$ . Przyjęto, że wartość współczynnika  $p_{glob}$  wynosi 0,3–0,8 w zależności od modelowanej sytuacji. Z kolei przyjęto, że zakres wartości wagi odległości dla sytuacji paniki w funkcji kosztu (równanie 5.1)  $w_d \in < 0, 9; 1 >$ , z kolei waga gęstości przyjmuje wartości z zakresu  $w_g \in < 0; 0, 1 >$ .

Symulacje przeprowadzono dla danych początkowych zgodnych z eksperymentami rzeczywistymi pierwszym i drugim. Wszystkie symulacje zostały powtórzone wielokrotnie, ze względu na elementy algorytmu ruchu zależne od zmiennej losowej.

#### Analiza ilościowa wyników symulacji

Do badań symulacyjnych przyjęto następujące wartości parametrów modelu: współczynnik  $p_{glob}$  (równanie 5.4) ma wartość 0,3, wartość wagi odległości  $w_d = 0,82$ , zaś wartość wagi gęstości  $w_g = 0,18$  dla promienia Moore’a  $R = 3$ .

Zestawienie najważniejszych danych porównawczych dla zwiększonej przepustowości wyjść ewakuacyjnych przedstawiono w poniższej tabeli 7.3:

	dane rzeczywiste	m. bazowy	m. SPA–BNE
Liczba osób	31	31	31
Liczba powtórzeń	1	10	10
Całk czas ewak [s]	6,16	6,44	5,91
<i>Wyjście tylne</i>			
Liczba osób	17	20	16
Czas ewakuacji[s]	4,93	6,44	5,43
<i>Wyjście przednie</i>			
Liczba osób	14	11	15
Czas ewakuacji[s]	6,16	4,06	5,99

Tabela 7.3: Zestawienie najważniejszych parametrów i wyników symulacji dla sytuacji ewakuacji w panice w oparciu o dane rzeczywiste i modele symulacyjne. W eksperymencie rzeczywistym i symulacji zwiększona przepustowość jednego z wyjść.

W tabeli A.10 przedstawiono rankingi czasów uzyskane przez pieszych w rzeczywistych badaniach i symulacji uzyskane w programach dla symulacji paniki.

Zestawienie najważniejszych danych porównawczych dla standardowej przepustowości drzwi przedstawiono w poniższej tabeli 7.4

	dane rzeczywiste	m. bazowy	m. SPA-BNE
Liczba osób	30	30	30
Liczba powtórzeń	1	10	10
Całk czas ewak [s]	6,00	6,44	6,05
<i>Wyjście tylne</i>			
Liczba osób	17	20	16
Czas ewakuacji[s]	4,98	6,44	5,54
<i>Wyjście przednie</i>			
Liczba osób	13	10	14
Czas ewakuacji[s]	6,00	4,48	6,05

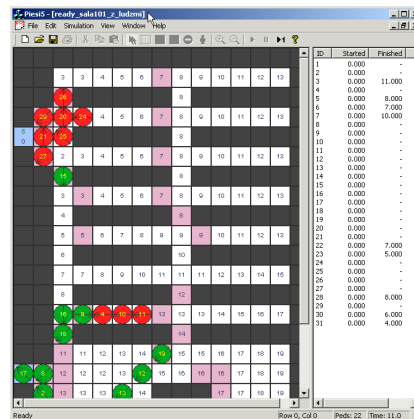
Tabela 7.4: Zestawienie najważniejszych parametrów i wyników symulacji dla sytuacji ewakuacji w panice, dla standardowej przepustowości drzwi, w oparciu o dane rzeczywiste i modele symulacyjne

Dla obydwu modelowanych przypadków symulacji paniki, można zauważyć, że wyniki uzyskane w modelu SPA-BNE znacznie lepiej odpowiadają wynikom badań eksperymentów rzeczywistych, niż wyniki z modelu bazowego. Dla obydwu symulowanych sytuacji można zaobserwować w modelu SPA-BNE podobną dystrybucję pieszych, która wybrała poszczególne wyjścia. Podobnie, całkowite czasy ewakuacji oraz czasy ewakuacji są zbieżne dla eksperymentów rzeczywistych oraz modelu SPA-BNE.

Z kolei w tabeli A.11 przedstawiono czasy uzyskane przez pieszych dla poszczególnych modeli, podczas rzeczywistych eksperymentów oraz w symulacjach komputerowych. Podobnie jak w pozostałych przypadkach, analiza rankingów symulacji pokazuje zależność początkowego położenia pieszego od uzyskanego czasu symulacji. Tę prawidłowość obserwować można w badaniach rzeczywistych oraz w modelu SPA-BNE, gdzie o kolejności ruchu pieszych w poszczególnych krokach czasowych decyduje umieszczenie ich na liście przy czym sortowanie odbywa się od wejść wgłąb pomieszczenia. W modelu bazowym kolejność w poszczególnych przebiegach symulacji jest zdeteterminowana kolejnością ruchu pieszych w danym kroku czasowym, ma to bezpośrednie przełożenie na uzyskiwane czasy w poszczególnych przebiegach symulacji.

### Analiza jakościowa wyników symulacji

Na rysunku 7.7 ukazano sytuację charakterystyczną dla paniki. W okolicy tylnego (górnego) wyjścia z pomieszczenia obserwujemy blokadę, związaną z wąskim gardłem. Pomimo ustalonej kolejności opuszczania pomieszczenia przez pieszych o numerach identyfikacyjnych 29, 27 i 21 (kolejności związanej z czasem oczekiwania na polu o potencjale równym 1) na skutek przepychania się nastąpiła blokada charakterystyczna dla sytuacji paniki.



Rysunek 7.7: Symulacja paniki. Charakterystyczna dla dużego stopnia determinacji pieszych jest blokada tylnego wyjścia

## 7.3 Wnioski

Przeprowadzone symulacje komputerowe pozwoliły zbadać zastosowanie modeli dynamiki pieszych dla poszczególnych sytuacji. Analiza ilościowa i jakościowa symulacji komputerowej w zestawieniu z wynikami badań eksperymentalnych pozwala wysnuć pewne ogólne wnioski.

Generalnie model bazowy, który najbliższy jest koncepcji klasycznego automatu komórkowego, nie daje tak dobrych wyników, jak zaproponowane w pracy modele oparte na technologii niehomogenicznych automatów komórkowych: SPA oraz SPA-BNE. Zarówno analiza ilościowa i jakościowa wykazuje, że mechanizmy zawarte, w opartym na literaturze, modelu bazowym są niewystarczające do skutecznego opisywania procesu opuszczania pomieszczenia przez pieszych. Możliwości rozróżniania między sytuacją normalną, kontrolowaną ewakuacją i paniką dają zaproponowane w niniejszej pracy modele SPA oraz SPA-BNE.

Strategie zaproponowane w modelu SPA oraz modelu SPA–BNE sprowadzają się do analizy dwóch czynników decydujących o wyborze wyjścia: odległości i zagęszczenia wokół wyjść. Dla sytuacji normalnej waga odległości ma kluczowe znaczenie, chociaż jak wykazały rzeczywiste eksperymenty, wagi gęstości nie można w modelowaniu pominąć. W przypadku obydwu zaproponowanych modeli możemy mówić o obserwacji otoczenia i bieżącym podejmowaniu decyzji o kierunku ewakuacji. Oznacza to reprezentowanie w modelach inteligentnych zachowań ludzi na poziomie strategicznym.

Model SPA–BNE został zaproponowany zarówno dla symulacji kontrolowanej ewakuacji oraz symulacji paniki. Mechanizm powstawania konfliktów i lokalnych blokad, który jest charakterystyczny dla paniki, może zaistnieć również przy kontrolowanej ewakuacji, przy zaistnieniu odpowiednich uwarunkowań. O wystąpieniu blokad decydowały uwarunkowania geometryczne modelu, zagęszczenie tłumu i globalne prawdopodobieństwo blokady – parametr związany z modelowaną sytuacją. Zarówno analiza jakościowa oraz ilościowa modelu potwierdzają słuszność takiego podejścia w modelowaniu kontrolowanej ewakuacji i paniki.

Obydwa modele: SPA oraz SPA–BNE przewidują pewne zdolności operacyjne pieszych. To znaczy dopuszczają one możliwość wykonywania ruchu dla pól o równym potencjale w sytuacji, kiedy pola o lepszym potencjale są niedostępne lub zablokowane. Daje to możliwość omijania przez pieszych niektórych lokalnych blokad. Jest to przykład reprezentacji inteligentnych zachowań pieszych na poziomie operacyjnym.

Istotnym faktem jest, że nie ma znaczących różnic w czasach obliczeń między modelami SPA oraz SPA–BNE a modelem bazowym, co zostało sprawdzone na dużych siatkach. Stąd widzimy, że zaproponowane w tych modelach mechanizmy nie powodują znaczącego spadku efektywności programu.

Reasumując zaproponowane w pracy modele SPA oraz SPA–BNE umożliwiają istotną poprawę realizmu symulacji procesu ewakuacji ludzi w stosunku do opisanego w pracy modelu bazowego.

# Rozdział 8

## Podsumowanie

Zasadniczym celem niniejszej pracy było opracowanie i formalne przedstawienie modeli matematycznych dotyczących dynamiki pieszych, na bazie niehomogenicznych automatów komórkowych. Kamieniem węgielnym przedstawionych modeli były zaproponowane w pracy definicje automatu komórkowego ze stałą siatką  $CAL_{const}$  oraz rozszerzonego automatu komórkowego  $ECAL_{const}$ .

Teza pracy została sformułowana następująco: *Wykorzystując zaproponowaną formalizację automatów komórkowych oraz bazując na obserwacjach profilu zachowań ludzi oraz eksperymentach rzeczywistych, można określić modele matematyczne dynamiki ruchu jednostek w różnych sytuacjach. W szczególności można modelować inteligentne zachowania ludzi.*

Na początku rozprawy zaprezentowano znane z literatury definicje oraz klasyfikacje automatów komórkowych. Następnie opisano charakterystyczne zjawiska w ruchu pieszych. W dalszej części scharakteryzowano metody symulacyjne modelowania dynamiki pieszych, zarówno o charakterze ciągłym jak i dyskretnym. Szczególną uwagę poświęcono technologii niehomogenicznych automatów komórkowych.

Zasadnicze badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy składają się z czterech, wzajemnie powiązanych części.

W pierwszej części zaproponowano nową definicję automatu komórkowego  $CAL_{const}$ , nazwanego *automatem ze stałą siatką*. Definicja ta obejmuje pojęcie klasycznego (homogenicznego) oraz pewną klasę niehomogenicznych automatów komórkowych. Zaproponowana definicja stanowi więc pomost pomiędzy klasycznymi i niehomogenicznymi automatami komórkowymi.

Na bazie automatu *ze stałą siatką* zaproponowano definicję niehomogenicznego automatu komórkowego nazwanego *rozszerzonym automatem komórkowym*  $ECAL_{const}$ . W oparciu o zaproponowaną strukturę *rozszerzonego automatu komórkowego* możliwe stało się definiowanie szeregu modeli opar-

tych na niehomogenicznych automatach komórkowych.

Druga część pracy obejmuje zaproponowane modele dynamiki pieszych, oparte o zdefiniowany wcześniej *rozszerzony automat komórkowy*.

Pierwszy z przedstawionych modeli, nazwany modelem bazowym powstał na podstawie modeli znanych z literatury. Idea tego automatu jest najbliższa klasycznemu automatu komórkowemu, dlatego też stanowi punkt odniesienia dla pozostałych, zaproponowanych modeli.

Kolejny z zaproponowanych w pracy modeli, model SPA opisuje strategiczne zdolności pieszych. Piesi poprzez analizę sytuacji, tj. poprzez sprawdzanie zatłoczenia i odległości, podejmują decyzję o kierunku ruchu w pomieszczeniu i skierowaniu się do określonego wyjścia z tegoż pomieszczenia. Istotą modelu SPA są trzy następujące elementy. Zaproponowanie nowej reguły lokalnej, która odzwierciedla proces decyzyjny pieszego z uwzględnieniem obserwacji otoczenia. Następnie zaproponowanie w funkcji przejścia nowej metody kolejności aktualizacji stanów komórek siatki (uwzględniającej położenie pieszego i czas oczekiwania w danym miejscu). Wreszcie zaproponowany został nowy algorytm ruchu, który uwzględnia zdolności pieszych na poziomie operacyjnym (omijanie lokalnych zatorów w ruchu i przeszkód).

Trzeci z przedstawionych modeli, model SPA-BNE służy do opisu sytuacji ewakuacyjnych (dla sytuacji kontrolowanej ewakuacji oraz paniki). W modelu tym piesi posiadają cechy inteligencji analogicznie jak opisane powyżej w podsumowaniu cechy modelu SPA. Natomiast w skutek możliwości występowania dużego zagęszczenia tłumu, wzrostu determinacji ludzi i niekorzystnych uwarunkowań geometrycznych pomieszczenia, model uwzględnia zakłócenia płynności ruchu – blokady.

Trzecia część pracy obejmuje eksperymenty rzeczywiste, które pozwalają skonfrontować przyjęte modele z rzeczywistością i przeprowadzić walidację zaproponowanych modeli dynamiki pieszych. Eksperymenty obejmowały opuszczanie pomieszczenia przez grupę pieszych dla różnych założeń: sytuacji normalnej, sytuacji kontrolowanej ewakuacji oraz sytuacji paniki. Proces podejmowania decyzji przez poszczególnych pieszych był odtwarzany na podstawie analizy zapisu audio-video przebiegu eksperymentu oraz analizy ankiet wypełnianych przez uczestników.

Czwartą część pracy poświęcono praktycznej implementacji zaproponowanych w niniejszej pracy modeli. Do celów symulacji dynamiki pieszych dla dowolnych geometrii pomieszczenia oraz różnorodnych sytuacji stworzono aplikację „Piesi”. W dalszej części poświęconej implementacji, przedstawiono i omówiono wyniki symulacji komputerowych przeprowadzonych dla poszczególnych modeli.

Za najważniejsze osiągnięcia pracy autor uważa:

- zaproponowanie formalnej, uniwersalnej definicji klasycznego automatu komórkowego, nazwanego automatem ze stałą siatką  $CAL_{const}$ . Definicja ta umożliwia szczegółowe definiowanie klasycznych automatów komórkowych i ponadto stanowi punkt wyjścia do definiowania niehomogenicznych automatów komórkowych,
- zaproponowanie definicji niehomogenicznego automatu komórkowego, nazwanego rozszerzonym automatem komórkowym  $ECAL_{const}$ . Definicja ta pozwala definiować różne klasy niehomogenicznych automatów komórkowych. Pozwala też modelować różnorodne zjawiska (systemy złożone), a w szczególności dynamikę pieszych,
- zaproponowanie szeregu algorytmów związanych z modelowaniem inteligentnych zachowań pieszych: model strategicznych zdolności pieszych SPA oraz model genezy generowania konfliktów SPA–BNE,
- zaprojektowanie i stworzenie aplikacji implementującej zaproponowane modele i umożliwiającą przeprowadzenie badań symulacyjnych,
- opracowanie nowej metodologii eksperymentów i przeprowadzenie rzeczywistych badań z grupą pieszych, dotyczącą dynamiki pieszych i ich procesu decyzyjnego poprzez:
  - zdefiniowanie celów ogólnych i szczegółowych dla uczestników, dotyczących wybranych sytuacji,
  - zbadanie przebiegu procesu ewakuacyjnego poprzez analizę zapisu audio–video, a także analizę ankiet opisujących proces decyzyjny uczestników,
- zaplanowanie i przeprowadzenie symulacji komputerowych umożliwiających porównanie i weryfikację zaproponowanych algorytmów,

Opracowane modele SPA oraz SPA–BNE powstałe na bazie niehomogenicznych automatów  $ECAL_{const}$  potwierdziły prawdziwość tezy.

W wyniku przeprowadzonych prac autor dostrzega następujące kierunki dalszych badań:

- zaproponowanie i przetestowanie kolejnych algorytmów umożliwiających realistyczne i efektywne metody modelowania dynamiki pieszych w oparciu o zaproponowaną formalizację dla innych klas sytuacji,



- porównanie funkcjonalności i efektywności metod modelowania dynamiki pieszych przy użyciu niehomogenicznych automatów komórkowych oraz metod opartych na MD (Dynamice Molekularnej),
- analiza zastosowania wielowarstwowych siatek dla niehomogenicznych automatów komórkowych,
- przeprowadzenie zrównoleglenia obliczeń dla zastosowanej technologii niehomogenicznych automatów komórkowych.

# Bibliografia

- [AHS05] H. Aritomo, I. Hitoshi, and W. Shiraki. Simulation of pedestrian dynamics in emergency for live design community. *Intelligent Systems and Control, Cambridge*, 2005.
- [APL04] S. Adachi, F. Peper, and J. Lee. Computation by asynchronously updating cellular automata. *Journal of Statistical Physics*, 2004.
- [Ari96] I. Arias. Proxemics in the ESL classroom. *Forum Vol. 34, No 1.*, 1996.
- [BA99] V. Blue and J. Adler. Bi-directional emergent fundamental flows from cellular automata microsimulation. *Proceedings of ISTTT*, pages 235–254, 1999.
- [BA00] V. Blue and J. Adler. Modelling four dimensional pedestrian movement. *Transportation research board*, 2000.
- [BCN97] E. Bouvier, E. Cohen, and L. Najman. From crowd simulation to airbag employment: particle systems, a new paradigm of simulation. *Journal of Electronic Imaging 6(1)*, pages 94–107, 1997.
- [BG88] A.H. Bond and L. Gasser. *Readings in Distributed Artificial Intelligence*. Morgan Kaufmann Pub, 1988.
- [BKSZ01] C.K. Burstedde, K. Klauck, A. Schadschneider, and J. Zittartz. Simulation of pedestrian dynamics using a 2-dimensional cellular automaton. *Phys. Rev. A 295*, pages 507–525, 2001.
- [Bla99] M. Blake. Glossary. [www.geog.leeds.ac.uk/staff/m.blake](http://www.geog.leeds.ac.uk/staff/m.blake), 1999.
- [BMV05] S. Bandini, S. Manzoni, and G. Vizzari. A spatially dependent communication model for ubiquitous systems. *Environments for Multi-Agent Systems*, Volume 3374:74 – 90, 2005.

- [BT99] J. Bates and T. Tompkins. *Poznaj Visual C++*. MIKOM, 1999.
- [CD98] B. Chopard and M. Droz. *Cellular Automata Modeling of Physical Systems*. Cambridge University Press, 1998.
- [Cet99] K. Cetnarowicz. *Problemy projektowania i realizacji systemów wieloagentowych*. Wydawnictwa AGH-UST, 1999.
- [CSST02] P. Corsonello, G. Spezzano, G. Staino, and D. Talia. Efficient implementation of cellular algorithms on reconfigurable hardware. *Proceedings of Euromicro-PDP*, pages 211–219, 2002.
- [CT04] B. Chopard and M. Tomassini. Randomized computation with cellular automata. *ACRI 2004, LNCS vol. 3305*, pages 71 – 80, 2004.
- [CY94a] P. Coad and E. Yourdon. *Analiza obiektowa*. Readme, 1994.
- [CY94b] P. Coad and E. Yourdon. *Programowanie obiektowe*. Readme, 1994.
- [DDW05] E. Dudek-Dyduch and J. Wąs. Formalizacja automatów komórkowych w zagadnieniach dynamiki pieszych. *Automatyka Journal AGH-UST, T. 9, Zeszyt 3*, pages 383–391, 2005.
- [DDW06] E. Dudek-Dyduch and J. Wąs. Knowledge representation of pedestrian dynamics in crowd. Formalism of cellular automata. *Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 4029*, 2006.
- [Dij57] E. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik 1*, pages 269–297, 1957.
- [DJT00] J. Dijkstra, A.J. Jessurun, and H. Timmermans. A multi-agent cellular automata system for visualising simulated pedestrian activity. *Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata - Proceedings on the 4th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry.*, pages 29–36, 2000.
- [DJT01] J. Dijkstra, A.J. Jessurun, and H. Timmermans. A multi-agent cellular automata model of pedestrian movement. *Pedestrian and evacuation dynamics*, pages 173–181, 2001.

- [Dzw04] W. Dzwiniel. A cellular automata model of population infected by periodic plague. *Proceedings of 6th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry*, pages 464–473, 2004.
- [ES93] D. Elliott and D. Smith. Football stadia disasters in the United Kingdom. *Industrial & Environmental Crisis Quarterly* 7, pages 205–229, 1993.
- [exo] Exodus. <http://fseg.gre.ac.uk/exodus/index.html>.
- [Fer99] J. Ferber. *Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence*. Addison-Wesley, 1999.
- [FHP86] U. Frisch, B. Hasslacher, and Y. Pomeau. Lattice-gas automata for the navier-stokes equation. *Phys. Rev. Lett.* 56, pages 1505–1508, 1986.
- [FI99] M. Fukui and Y. Ishibashi. Self-organized phase transitions in ca-models for pedestrians. *J. Phys. Soc. Japan*, pages 2861–2863, 1999.
- [Fre24] S. Freud. *Massenpsychologie und Ich-analyse*. Int. Psychoanalytischer Verlag, 1924.
- [Gan98] J. Ganem. A behavioral demonstration of Fermats principle. *The physics teacher* 36, pages 76–78, 1998.
- [Gar70] M. Gardner. The fantastic combinations of john conway. *Scientific American* 220(4), page 120, 1970.
- [Gei91] L. Geisler. *Doctor and Patient — a partnership through dialog*. Farma – Verlag, 1991.
- [Ger99] N. Gershenfeld. *The nature of Mathematical Modeling*. Cambridge University Press, 1999.
- [GK99] N. Goldenfeld and L. P. Kadanoff. Simple lessons from complexity. *Science*, (248):87–89, 1999.
- [GMB99] E. Graat, C. Midden, and P. Bockholts. Complex evacuation. effects of motivation level and slope of stairs on emergency egress time in a sport stadium. *Safety science* 31, pages 127–141, 1999.

- [Grę99] J. Grębosz. *Symfonia C++*. Oficyna Kallimach, Kraków, 1999.
- [GSN04] C. Gloor, P. Stucki, and K. Nagel. Hybrid techniques for pedestrian simulations. *Proceedings of 6th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry*, pages 581–590, 2004.
- [Gut93] H. Gutowitz. Cryptography with dynamical systems. *Cellular Automata and Cooperative Phenomena*, pages 237–274, 1993.
- [GW05] B. Gudowski and J. Wąs. Zdolności strategiczne pieszych w symulacji dynamiki ruchu metodą automatów komórkowych. *Symulacja w badaniach i rozwoju, XI Warsztaty PTSK*, pages 508–515, 2005.
- [Hal59] E.T Hall. *The Silent Language*. Garden City, New York, 1959.
- [Hal66] E.T Hall. *The Hidden Dimension*. Garden City, New York, 1966.
- [HB00] S. Hoogendoorn and P. Bovy. Gas kinetic modelling and simulation of flows. *Proceedings of the Transportation Research Board*, 2000.
- [Hec98] R. Heczko. Systemy wieloagentowe. <http://ie.silesnet.cz/mas-pl.html>, 1998.
- [Hel92] D. Helbing. A fluid – dynamic model for movement of pedestrian. *Complex systems*, 6:391 – 415, 1992.
- [Hen71] L. Henderson. The statistics of crowd fluids. *Nature* 229, pages 381–383, 1971.
- [HFMV02] D. Helbing, I. Farkas, P. Molnar, and T. Vicsek. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. *Proceedings of pedestrian and evacuation dynamics*, 2002.
- [HFV00] D. Helbing, I. Farkas, and T. Vicsek. Simulation dynamical features of escape panic. *Nature* 407, pages 487–490, 2000.
- [HM95] D. Helbing and P. Molnar. A social force model for pedestrian dynamics. *Phys. Rev. E* 51,, pages 4284–4286, 1995.
- [HM96] J. Harbst and F. Madsen. The behaviour of passengers in a critical situation on board a passenger vessel or ferry. *Technical report, Danish Investment Foundation*, 1996.

- [HMFV01] D. Helbing, P. Molnar, I. Farkas, and T. Vicsek. Self organizing pedestrian movement. *Planning and Design*, vol 28, pages 361–383, 2001.
- [HPdP73] J. Hardy, Y. Pomeau, and O. de Pazzis. Time evolution of two-dimensional model system. *J. Math. Phys.* 14, pages 1746–1759, 1973.
- [HW58] B. Hankin and R. Wright. Passenger flow in subways. *Operational research*, (Quarterly 9):81–88, 1958.
- [ISO] ISO. Fire safety engineering. Technical Recommendation TR 13387, International Organization for Standardization.
- [Kea82] J.P. Keating. The myth of panic. *Fire journal*, May, pages 57–61, 1982.
- [Klü03] H. Klüpfel. *Cellular automaton model for crowd movement and egress simulation*. PhD thesis, University Duisburg-Essen, 2003.
- [KM03] J. A. Kirkland and A. Maciejewski. A simulation of attempts to influence crowd dynamics. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pages 4328–4333, 2003.
- [KMK] H. Klüpfel and T. Meyer-Köning. Aeneas. <http://www.traffgoht.com/en/pedestrians/products/aeneas/index.html>.
- [KMKS01] H. Klüpfel, J. Meyer-Köning, and M. Schreckenberg. Microscopic modelling of pedestrian motion – comparison of simulation results with an evacuation exercise in a primary school. *International Workshop on Traffic and Granular Flow*, 2001.
- [KMKWS00] H. Klüpfel, T. Meyer-Köning, J. Wahle, and M. Schreckenberg. Microscopic simulation of evacuation processes on passenger ships. *ACRI*, pages 63–71, 2000.
- [Kuł00] K. Kułakowski. *Automaty Komórkowe*. AGH-UST, Ośrodek Edukacji Niestacjonarnej, 2000.
- [LB95] G. Le Bon. *Psychologie des foules*. Félix Alcan 9e édition, <http://classiques.uqac.ca/classiques> Une édition numérique réalisée grâce a’ la générosité de M. Roger Deer, retraité et bénévole., 1895.

- [Loz02] D. Lozowicka. Using genetic algorithm method for improving evacuation analysis at passenger ship. *Conference Reliability Based Design and Optimisation, PAN, Warszawa*, 2002.
- [Loz05] D. Lozowicka. *Analiza czasu ewakuacji na statku w funkcji wybranych parametrów*. Phd, Politechnika Szczecińska, Wydział Techniki Morskiej, 2005.
- [MC06] S. Marconi and B. Chopard. Discrete physics, cellular automata and cryptography. *LNCS*, 4173:617–626, 2006.
- [MIN99] M. Muramatsu, T. Irie, and T. Nagatani. Jamming transition in pedestrian counter flow. *Physica A* 267, pages 487–498, 1999.
- [Mul96] J. Mulawka. *Systemy ekspertowe*. WNT, 1996.
- [Mul99] K. Muller. Die evakuierung von personen aus gebauden ... *Zeitschrift* 3, 1999.
- [NECSI] New England Complex Systems Institute. <http://www.necsi.org/guide/whatis.html>.
- [Neh02] C.L. Nehaniv. Self-reproduction in asynchronous cellular automata. *NASA Conference on Evolvable Hardware*, (201–209), 2002.
- [NS92] K. Nagel and M. Schreckenberg. A cellular automaton model for freeway traffic. *J. Phys. I* 2, pages 2221–2229, 1992.
- [NSM04] K. Narimatsu, T. Shiraishi, and S. Morishita. Acquisiting of local neighbour rules in the simulation of pedestrian flow by cellular automata. *Proceedings of 6th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry*, pages 211–219, 2004.
- [Old68] S. Older. Movement pedestrians on footways in shopping streets. *Traffic Engineering & Control*, pages 160–163, 1968.
- [Pau82] J. Pauls. The movement of people in buildings and design solution for means of egress. *Fire technology*, (20):27–47, 1982.
- [Pau95] J. Pauls. *Movement of people*. DiNenno, 1995.
- [Pid94] M. Pidd. *Computer Simulation in Managment Science*. Wiley, 1994.

- [Rey87] C.W. Reynolds. Flocks, herds, and schools a distributed behavioral model. computer graphics. *SIGGRAPH '87 Conference Proceedings*, pages 25–34, 1987.
- [Ruc99] R. Rucker. *Seek! Selected nonfiction by Rudy Rucker*. Four Walls Eight Windows, New York, 1999.
- [SdR99] B. Shönfish and A de Roos. Synchronous and asynchronous cellular automata. *BioSystems* 51, pages 123–143, 1999.
- [SDRT04] W. Spataro, D. D'Ambrosio, R. Rongo, and G.A. Trunfio. An evolutionary approach for modelling lava flows through cellular automata. *Proceedings ACRI 2004*, (LNCS 3305):725–734, 2004.
- [Sig04] R. Signorile. A framework combining cellular automata and multi-agent in a unified simulation system for crowd control. *Proceedings European Simulation Symposium*, 2004.
- [sim] Simwalk. <http://www.simwalk.ch/pedestrians/index.html>.
- [Sim90] J. Sime. The concept of panic. *Fires and Human Behaviour*, D. Fulton Publishers, pages 63–82, 1990.
- [SNL<sup>+</sup>04] W. Schmid, K. Nagel, E. Lange, D. Cavens, and C. Glor. Alpsim. <http://www.vsp.tu-berlin.de/archive/simarchive/projects/alpsim/>, 2004. The project is funded by the Swiss National Science Foundation via NFP 48.
- [Str02] B. Strustrup. *Język C++*. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, 2002.
- [Suz04] T. Suzudo. Searchin for pattern-forming asynchronous cellular automata – and evolutionery approach. *ACRI 2004*, *LNCS vol.3305*, pages 151–160, 2004.
- [SW04] M. Szulc and D. Właż. Symulacja dynamiki tłumu metodą oddziałujących cząstek i automatów komórkowych. Master's thesis, AGH-UST, 2004.
- [TD04] P. Topa and W. Dzwinel. Consuming environment with transportation network modelled using graph of cellular automata. *PPAM 2003*, *LNCS vol. 3019*, pages 513 – 520, 2004.



- [Top01] P. Topa. Anastomosing transportation networks. *Proceedings of PPAM 2001*, (LNCS 2328):904–911, 2001.
- [Top05] P. Topa. *Informatyczne modele wzrostu w wybranych zagadnieniach geologii*. PhD thesis, AGH–UST, 2005.
- [tra] Traffgo. <http://www.traffgo-ht.com/en/index.html>.
- [TTaA04] J. Tyszka, P. Topa, P. Łabaj, and W. Alda. Nowa metoda modelowania morfogenezy otwornic. *Geological Review*, (t.52 no.1):80–83, 2004.
- [Tyl] T Tyler. Cellular automata. <http://cell-auto.com/>.
- [vN66] J. von Neumann. Theory of self-reproducing automata. University of Illinois Press, 1966.
- [Wei98] J.R. Weimar. *Simulation with Cellular Automata*. Logos-Verlag, 1998.
- [WG04] J. Wąs and B. Gudowski. The application of cellular automata for pedestrian dynamic simulation. *Automatyka Journal AGH-UST, T.8 Z.3*, pages 303–313, 2004.
- [WG05] J. Wąs and B. Gudowski. Simulation of strategical abilities in pedestrian movement using cellular automata. *Proceedings of 24th IASTED Modeling Identification Control Conference, Innsbruck*, pages 549–553, 2005.
- [WGM06a] J. Wąs, B. Gudowski, and P. J. Matuszyk. New cellular automata model of pedestrian representation incorporating proxemics into people dynamics. *Crowds and Cellular Automata*, 2006.
- [WGM06b] J. Wąs, B. Gudowski, and P. J. Matuszyk. Social distances model of pedestrian dynamics. *International Conference on Cellular Automata For Research & Industry, Perpignan, France, Lecture Notes in Computer Science*, 2006.
- [Wik] Wikipedia. Wolna encyklopedia. <http://pl.wikipedia.org>.
- [Wol84] S. Wolfram. Universality and complexity in cellular automata. *Physica D 10*, pages 1–35, 1984.

- [Wol85] S. Wolfram. Cryptography with cellular automata. *Advances in cryptology – CRYPTO 85, LNCS 218*, pages 429–432, 1985.
- [Wol02] S. Wolfram. *A new kind of Science*. Wolfram Media, 2002.
- [Wąs05] J. Wąs. Cellular automata model of pedestrian dynamics for normal and evacuation conditions. *Proceedings of Intelligent Systems Design and Applications, IEEE Computer Society, Washington Brussels Tokyo*, pages 154–159, 2005.
- [Yam01] K. Yamori. Going with the flow: Micro–macro dynamics in the macrobehavioral patterns of pedestrian crowds. *Psychological Review 105(3)*, pages 530–557, 2001.
- [Zip49] G.K. Zipf. *Human Behaviour and the Principle of Least Effort*. Addison–Vesley Press, 1949.

## Dodatek A

Pozycja w rankingu	Czas ewakuacji [s]	ID piesz.	Wybrane wyjście [T]ylne/[P]rzednie
1	0,86	31	T
2	1,26	30	T
3	1,66	28	T
4	2	29	T
5	2,12	6	P
6	2,2	23	T
7	2,46	27	T
8	2,48	4	P
9	2,6	22	T
10	2,64	5	P
11	2,93	26	T
12	3,04	18	P
13	3,13	21	T
14	3,4	25	T
15	3,44	7	P
16	3,46	17	T
17	3,72	3	P
18	3,73	16	T
19	3,76	8	P
20	3,93	20	T
21	4,2	14	T
22	4,28	2	P
23	4,33	24	T
24	4,64	1	P
25	4,66	19	T
26	4,72	9	P
27	4,93	12	T
28	4,96	11	P
29	5,52	13	P
30	5,92	10	P
31	6,16	15	P

Tabela A.1: Ranking pieszych z czasami opuszczania pomieszczenia przez poszczególnych uczestników w eksperymencie pierwszym – symulacji paniki

Pozycja w rankingu	Czas ewakuacji [s]	ID piesz.	Wybrane wyjście [T]ylne/[P]rzednie
1	1,06	31	T
2	1,34	30	T
3	1,7	28	T
4	1,98	29	T
5	2	6	P
6	2,1	23	T
7	2,42	22	T
8	2,52	5	P
9	2,74	27	T
10	2,78	21	T
11	2,84	4	P
12	3,14	26	T
13	3,24	7	P
14	3,3	17	T
15	3,34	25	T
16	3,4	3	P
17	3,6	8	P
18	3,66	20	T
19	3,76	10	P
20	3,78	16	T
21	3,94	15	T
22	3,98	24	T
23	4,08	18	T
24	4,46	19	T
25	4,48	9	P
26	4,98	14	T
27	5,08	11	P
28	5,44	13	P
29	5,68	12	P
30	6,00	2	P
31	—	1	—

Tabela A.2: Ranking pieszych z czasami opuszczania pomieszczenia przez poszczególnych uczestników w eksperymencie drugim – symulacji paniki

Pozycja w rankingu	Czas ewakuacji [s]	ID piesz.	Wybrane wyjście [T]ylne/[P]rzednie
1	0,52	31	T
2	0,92	30	T
3	1,2	28	T
4	1,8	23	T
5	1,8	6	P
6	1,92	22	T
7	2,32	29	T
8	2,68	5	P
9	2,72	27	T
10	2,76	17	T
11	3	3	P
12	3,08	21	T
13	3,24	8	P
14	3,56	26	T
15	3,6	10	P
16	3,64	4	P
17	3,96	25	T
18	4	16	T
19	4,32	15	T
20	4,32	11	P
21	4,36	18	P
22	4,76	20	T
23	5,12	14	T
24	5,12	9	P
25	5,32	12	T
26	5,48	7	P
27	5,8	19	T
28	6,04	1	P
29	6,12	24	T
30	6,12	13	P
31	6,24	2	P

Tabela A.3: Ranking pieszych z czasami opuszczania pomieszczenia przez poszczególnych uczestników w eksperymencie trzecim – kontrolowanej ewakuacji

Pozycja w rankingu	Czas ewakuacji [s]	ID piesz.	Wybrane wyjście [T]ylne/[P]rzednie
1	1,24	31	T
2	2	30	T
3	2,48	28	T
4	3,08	23	T
5	3,24	6	P
6	3,52	29	T
7	3,96	22	T
8	4,52	27	T
9	4,8	5	P
10	5,32	21	T
11	5,52	4	P
12	6,12	17	T
13	6,68	10	P
14	6,76	26	T
15	7,28	16	T
16	7,68	18	P
17	8,08	20	T
18	8,44	8	P
19	8,76	25	T
20	8,88	15	T
21	9,52	19	T
22	9,72	9	P
23	9,84	7	P
24	10	14	T
25	10,76	3	P
26	10,96	1	P
27	11,2	13	T
28	11,52	12	T
29	11,68	11	P
30	12,44	24	T
31	12,56	2	P

Tabela A.4: Ranking pieszych z czasami opuszczania pomieszczenia przez poszczególnych uczestników w eksperymencie czwartym – normalnym opuszczaniu pomieszczenia

ID pieszego	Pytanie 1	Pytanie 2	Pytanie 3
1	A	AD	A
2	A	AD	A
3	A	AB	A
4	A	ABD	A
5	C	AD	A
6	B	AE	A
7	A	AD	A
8	B	AD	A
9	A	A	A
10	A	A	B
11	A	A	A
12	A	AB	B
13	A	AD	B
14	A	AB	A
15	A	BD	A
16	A	AB	A
17	A	A	A
18	C	B	A
19	B	AB	A
20	A	E	A
21	B	A	A
22	B	A	A
23	B	A	A
24	A	A	A
25	A	AC	A
26	B	A	A
27	B	A	A
28	B	A	A
29	B	AB	A
30	B	A	A
31	B	A	A

Tabela A.5: Analiza ankiet z odpowiedziami poszczególnych pieszych dotycząca eksperymentu pierwszego – symulacji paniki. Pytania do ankiet znajdują się w sekcji 6.1.1



ID pieszego	Pytanie 1	Pytanie 2	Pytanie 3
1	A	AD	A
2	A	BD	A
3	B	BC	A
4	A	A	A
5	A	AB	A
6	B	AE	A
7	B	ABD	A
8	B	ABC	A
9	B	AB	A
10	A	A	A
11	B	A	A
12	A	BD	B
13	A	AB	A
14	A	AB	A
15	A	AB	A
16	A	A	A
17	B	A	A
18	A	B	A
19	A	ABCD	A
20	B	A	A
21	B	A	A
22	A	AB	A
23	B	AC	A
24	B	A	A
25	A	A	A
26	B	A	A
27	B	A	A
28	A	A	A
29	A	A	A
30	B	A	A
31	B	A	A

Tabela A.6: Analiza ankiet z odpowiedziami poszczególnych pieszych dotycząca eksperymentu trzeciego – kontrolowanej ewakuacji. Pytania do ankiet znajdują się w sekcji 6.1.1

ID pieszego	Pytanie 1	Pytanie 2	Pytanie 3
1	B	AB	A
2	A	B	B
3	B	ABD	B
4	A	AC	A
5	B	AC	A
6	B	ACD	A
7	B	ADE	A
8	B	C	A
9	B	AC	A
10	A	A	A
11	A	A	A
12	B	D	A
13	B	B	A
14	B	A	A
15	B	A	A
16	A	C	A
17	B	ABD	A
18	C	B	A
19	B	A	A
20	B	C	A
21	B	A	A
22	B	ABD	A
23	–	–	–
24	B	A	A
25	B	A	A
26	B	A	A
27	B	D	A
28	A	A	A
29	B	AC	A
30	B	A	A
31	B	A	A

Tabela A.7: Analiza ankiet z odpowiedziami poszczególnych pieszych dotycząca eksperymentu czwartego – normalnego opuszczania pomieszczenia. Pytania do ankiet znajdują się w sekcji 6.1.1

ID pieszego	czas eksperym.	model bazowy	model SPA-BNE
1	6,04	4,31	4,40
2	6,24	4,17	4,31
3	3,00	3,08	3,22
4	3,64	3,28	3,84
5	2,68	2,38	2,66
6	1,80	1,96	2,07
7	5,48	2,38	2,58
8	3,24	3,02	4,42
9	5,12	3,89	4,82
10	3,60	3,95	4,82
11	4,32	4,54	5,29
12	5,32	6,38	5,94
13	6,12	5,80	5,57
14	5,12	5,68	5,80
15	4,32	5,01	5,21
16	4,00	4,03	4,73
17	2,76	2,80	3,14
18	4,36	2,52	4,79
19	5,80	5,77	4,98
20	4,76	4,79	3,72
21	3,08	3,98	3,22
22	1,92	2,24	2,32
23	1,80	1,40	1,46
24	6,12	4,93	4,42
25	3,96	5,01	4,26
26	3,56	3,81	3,39
27	2,72	3,11	2,83
28	1,20	1,96	1,88
29	2,32	3,58	2,86
30	0,92	1,68	1,79
31	0,52	1,12	1,12

Tabela A.8: Zestawienie czasów kontrolowanej ewakuacji dla poszczególnych pieszych. W pierwszej kolumnie umieszczono nr identyfikacyjny pieszego, w drugiej kolumnie przedstawiono czasy uzyskane podczas badań eksperymentalnych, w dalszych kolumnach przedstawiono czasy uzyskane dla modeli symulacyjnych dla kontrolowanej ewakuacji

ID pieszego	czas eksperyment	model bazowy	model SPA
1	10,96	8,62	8,90
2	12,56	8,34	7,90
3	10,76	6,16	6,16
4	5,52	6,55	6,78
5	4,80	4,76	4,76
6	3,24	3,92	3,92
7	9,84	4,76	4,76
8	8,44	6,05	5,99
9	9,72	7,78	8,01
10	6,68	7,90	8,34
11	11,68	9,07	9,35
12	11,52	12,77	11,59
13	11,20	11,59	10,86
14	10,00	11,37	11,31
15	8,88	10,02	9,07
16	7,28	8,06	8,34
17	6,12	5,60	5,60
18	7,68	5,04	5,04
19	9,52	11,54	11,20
20	8,08	9,58	8,12
21	5,32	7,95	7,45
22	3,96	4,48	4,48
23	3,08	2,80	2,80
24	12,44	9,86	10,14
25	8,76	10,02	9,97
26	6,76	7,62	8,06
27	4,52	6,22	6,33
28	2,48	3,92	3,92
29	3,52	7,17	8,12
30	2,00	3,36	3,36
31	1,24	2,24	2,24

Tabela A.9: Zestawienie czasów normalnego opuszczania pomieszczenia dla poszczególnych pieszych. W pierwszej kolumnie umieszczono nr identyfikacyjny pieszego, w drugiej kolumnie przedstawiono czasy uzyskane podczas badań eksperymentalnych, w dalszych kolumnach przedstawiono czasy uzyskane dla modeli symulacyjnych dla sytuacji normalnej.

ID pieszego	czas eksperyment.	model bazowy	model SPA-BNE
1	4,64	3,92	4,31
2	4,28	3,70	4,09
3	3,72	3,08	3,22
4	2,48	3,22	3,67
5	2,64	2,46	2,58
6	2,12	1,96	2,02
7	3,44	2,30	2,38
8	3,76	3,02	3,86
9	4,72	3,22	5,01
10	5,92	3,67	4,48
11	4,96	3,98	5,15
12	4,93	6,41	5,68
13	5,52	5,94	5,29
14	4,20	5,24	5,49
15	6,16	4,76	5,04
16	3,73	4,06	4,90
17	3,46	2,80	3,28
18	3,04	2,52	4,68
19	4,66	5,49	5,35
20	3,93	4,28	3,50
21	3,13	3,89	4,12
22	2,60	2,24	2,27
23	2,20	1,40	1,43
24	4,33	4,98	4,12
25	3,40	5,40	4,03
26	2,93	4,09	2,94
27	2,46	3,16	2,88
28	1,66	1,96	1,96
29	2,00	4,17	2,66
30	1,26	1,68	1,74
31	0,86	1,12	1,12

Tabela A.10: Zestawienie czasów symulacji paniki dla poszczególnych pieszych przy zmniejszonej przepustowości drzwi. W pierwszej kolumnie umieszczono nr identyfikacyjny pieszego, w drugiej kolumnie przedstawiono czasy uzyskane podczas badań eksperymentalnych, w dalszych kolumnach przedstawiono czasy uzyskane dla poszczególnych modeli symulacyjnych

ID pieszego	czas eksperyment.	m. bazowy	m. SPA-BNE
1	–	–	–
2	6,00	3,86	4,37
3	3,40	3,08	3,25
4	2,84	3,70	3,78
5	2,52	2,38	2,46
6	2,00	1,96	1,99
7	3,24	2,38	2,55
8	3,60	2,91	4,17
9	4,48	3,78	5,04
10	3,76	3,78	4,51
11	5,08	4,37	4,84
12	5,68	6,33	5,46
13	5,44	5,68	5,63
14	4,98	5,60	5,68
15	3,94	5,24	4,98
16	3,78	3,92	5,01
17	3,30	2,88	3,22
18	4,08	2,55	5,07
19	4,46	5,96	5,10
20	3,66	4,48	3,86
21	2,78	3,95	2,97
22	2,42	2,21	2,24
23	2,10	1,40	1,43
24	3,98	4,90	4,56
25	3,34	4,90	4,26
26	3,14	3,72	3,28
27	2,74	3,14	3,00
28	1,70	1,99	1,99
29	1,98	3,95	2,86
30	1,34	1,68	1,74
31	1,06	1,12	1,12

Tabela A.11: Zestawienie czasów symulacji paniki dla poszczególnych pieszych przy standardowej przepustowości drzwi. W pierwszej kolumnie umieszczono nr identyfikacyjny pieszego, w drugiej kolumnie przedstawiono czasy uzyskane podczas badań eksperymentalnych, w dalszych kolumnach przedstawiono czasy uzyskane dla poszczególnych modeli symulacyjnych