

Michał KAPAŁKA

Wojskowa Akademia Techniczna, 00-908 Warszawa, ul. Kaliskiego 2

E-mail: kapalka.michal@gmail.com

Symulacja zachowania tłumu w dynamicznym otoczeniu

1 Wprowadzenie

Człowiek już od początku swojego istnienia dążył do tego, aby żyć w grupie. Jednym z powodów tego zjawiska była chęć poprawy swojego bezpieczeństwa. W dzisiejszych czasach jest podobnie, jednak tendencja tworzenia coraz większych grup spowodowała, że dzisiejsze „tłumy”, będące konsekwencją życia w skupiskach, stały się zagrożeniem dla ludzi. Każdego roku dochodzi do nieprzewidywanych i niekontrolowanych zjawisk przemieszczania się tłumu, w których odnosi obrażenia, a nawet traci życie duża liczba osób. Już w latach 50-tych zauważono ten problem i zaczęto szukać nie tylko technicznych, ale i naukowych metod jego rozwiązania. Modelowanie zachowania, a następnie symulacja zjawisk zachodzących w trakcie przemieszczania się tłumu, stały się narzędziem, które zaczęto wykorzystywać w wielu innych dziedzinach związanych z bezpieczeństwem ludzi w tłumie. W niniejszej pracy zostanie przedstawiony autorski model i symulator tłumu oraz jego zastosowanie jako narzędzia do badania bezpieczeństwa ludzi na wybranym terenie aglomeracji. W przyjętym rozwiązaniu założono, że głównym celem jest odwzorowanie rzeczywistego zachowania ludzi w sytuacjach dynamicznie zmieniającego się zagęszczenia w otoczeniu. Do takich sytuacji można zaliczyć większość zjawisk związanych z przemieszczaniem się ludzi w aglomeracji: centra handlowe, stacje metra, budynki użyteczności publicznej i ich otoczenie, imprezy masowe itp. Możliwość badania zachowania tłumu w takich sytuacjach może dać wiele odpowiedzi związanych z bezpieczeństwem ludzi będących w tłumie. Ze względu na złożoność i interdyscyplinarność zagadnienia jakim jest zachowanie tłumu powstało wiele podejść przy tworzeniu modeli i symulatorów, wśród których trudno wskazać rozwiązania szandarowe. Główne różnice w tych podejściach dotyczą sposobu: reprezentacji przestrzeni (ciągła - nieciągła), reprezentacji jednostki (modele mikro i makroskopowe), odwzorowania zachowania jednostki (brak zachowań, prawa fizyki, systemy regułowe, sztuczna inteligencja) i symulacji (programowanie matematyczne, automaty komórkowe, systemy kolejkowe, systemy agentowe).

2 Model formalny

W przyjętym rozwiązaniu przestrzeń odwzorowana jest na dwóch poziomach. Na poziomie decyzyjnym jest ona przedstawiona w postaci grafu w którym: każdy wierzchołek reprezentuje logiczną „podprzestrzeń” (np.: biuro, korytarz, schody, ulica, sklep, itp.), każda gałąź odwzorowuje możliwość przejścia pomiędzy wierzchołkami. Na poziomie działania przestrzeń przedstawiona jest w postaci sieci połączonych między sobą kwadratowych komórek, po których mogą się przemieszczać jednostki (w jednej komórce może znajdować się maksymalnie jedna osoba).

Model przestrzeni

Na poziomie działania przestrzeni o wymiarach (liczba komórek) $X, Y, Z \in \mathbb{N}$ zdefiniowana jest w postaci:

$$E^A = \{X, Y, Z, C, C^D, C^N, \vec{C}, R^C, C^R, S, C^S\} \quad (1)$$

Gdzie:

\mathbb{N} – zbiór liczb naturalnych,

(x, y, l) – identyfikator komórki: x, y (współrzędne na płaszczyźnie), l (poziom),

C – sieć (zbiór) komórek:

$$C = \{(x, y, z) \in \mathbb{N}^3 : x \leq X \wedge y \leq Y \wedge z \leq Z\} \quad (2)$$

C^D – zbiór możliwych kierunków przemieszczania się jednostki,

$$C^D = \{(x, y) \in \{-1, 0, 1\}^2 : |x| + |y| > 0\} \quad (3)$$

$C^N: C \rightarrow 2^C$ – funkcja określająca otoczenie komórki (x, y, z)

$$C^N((x, y, z)) = \{(x', y', z') \in C : (x - x', y - y') \in C^D \wedge (z' = z)\} \quad (4)$$

(\star^1) określa dodatkową zależność, którą jest możliwość bezpośredniego przejścia z komórki (x, y, z) do komórki (x', y', z') ,

$\vec{C}: C \times C^D \times \mathbb{N} \rightarrow 2^C$ – funkcja określająca zbiór zawierający komórkę w kierunku $d' = (x', y')$ w odległości n (l. komórek) z komórki $c = (x, y, z)$

$$\vec{C}((x, y, z), d, n) = \begin{cases} \{(i, j, k) \in C^N((x, y, z)) : (i - x, j - y) = d\} & \text{dla } n = 1 \\ \bigcup_{c' \in \vec{C}((x, y, z), d, n-1)} \vec{C}(c', d, 1) & \text{dla } n > 1 \end{cases} \quad (5)$$

R^C – zbiór wszystkich tras w sieci komórek,

$$R_i^C = \{((x_n, y_n, z_n)_{n=1}^i) \in C^i : \exists_{z, n} (x_i, y_i, z_i) \in C^N((x_1, y_1, z_1))\} \quad (6)$$

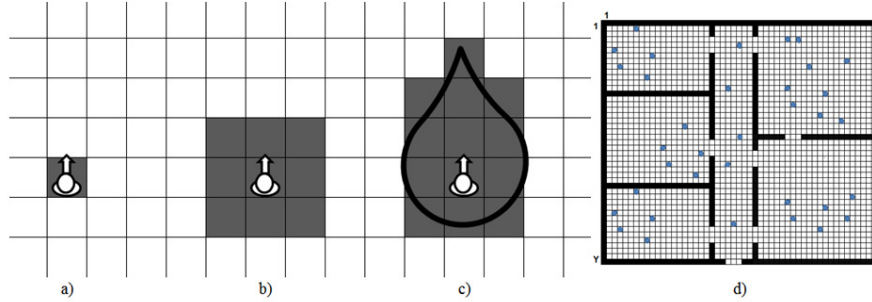
$$R^C = \bigcup_{i=1}^{|C|} R_i^C \quad (7)$$

$C^R: C \times C \rightarrow R^C$ – funkcja określająca zbiór tras między dwiema różnymi komórkami,

$$C^R(c_f, c_i) = \{(c_i)_{i=1}^n\} \in R^C : n \leq |C| \wedge c_1 = c_f \wedge c_n = c_i \quad (8)$$

$S \in 2^{\mathbb{N}}$ – zbiór możliwych stanów komórek, gdzie 3 podstawowe stany to: 0 – wolna, 1 – zajęta przez jednostkę, 2 – zajęta przez ruchomy obiekt,

$C^S: C \rightarrow S$ – funkcja określająca stan komórki (x, y, z)



Rys. 1 Przestrzenie interpersonalne (a,b,c), model komórkowy otoczenia (d)

Fig. 1 Interpersonal spaces (a,b,c), fine network model(d)

Przestrzeń na poziomie decyzyjnym przedstawiona jest w postaci:

$$E^D = (G, G^N, R^G, G^R) \quad (9)$$

gdzie:

$G = (W, U)$ - graf Berge'a bez pętli, W - zbiór wierzchołków, U -zbiór łuków,

$G^N: W \rightarrow 2^W$ - funkcja określająca sąsiedztwo dla wierzchołka n ,

$$G^N(n) = \{x \in W: (n, x) \in U\} \quad (10)$$

R^G -zbiór wszystkich dróg w grafie G ,

$$R^G = \bigcup_{i=1}^{|W|} R_i^G, R_i^G = \left\{ \{(z_j)_{j=1}^i\} \in W^i: j = \frac{\nu}{2, n} \quad (z_{j-1}, z_j) \in U \right\} \quad (11)$$

$G^R: W \times W \rightarrow R^G$ - funkcja określająca zbiór dróg z wierzchołka x do innego wierzchołka y ,

$$G^R(x, y) = \left\{ \{(z_i)_{i=1}^n\} \in R^G: n \leq |W|, z_1 = x \wedge z_n = y \right\} \quad (12)$$

Na podstawie zależności (1-14) autorski hybrydowy model otoczenia przedstawiono w postaci:

$$E = (E^A, E^D, F^{CG}) \quad (13)$$

gdzie:

$F^{CG}: W \rightarrow 2^C$ - funkcja określająca zbiór komórek należących do wierzchołka, spełniająca zależności:

$$\forall x, y \in W \quad x \neq y \Rightarrow (F^{CG}(x) \cap F^{CG}(y) = \emptyset) \quad (14)$$

$$\forall n \in W \quad \left(a, b \in F^{CG}(n) \left(\exists r \in C^R(a, b) \right) \right) \quad (15)$$

$$(x, y) \in U \left(a \in F^{CG}(x), b \in F^{CG}(y) \left(\exists r \in C^R(a, b) \right) \right) \quad (16)$$

Model tłumu

Definiując model tłumu autor przyjął następujące założenia: heterogeniczność jednostek, w pewnych sytuacjach sposób zachowania wszystkich jednostek jest

podobny, zachowanie jednostki zależy od sytuacji (np.: zagęszczenie czy stres). Jako rozwiązanie autorzy proponują system agentowy, w którym modelem jednostki tłumu jest autonomiczny agent posiadający własne: cechy, stan i sposób zachowania. Model tłumu (agentów) można przedstawić jako:

$$A^C = \{(\alpha^A, \alpha^S, \alpha^G, \alpha^L, \alpha^{TL}) \in A^A \times A^S \times 2^{A^G} \times 2^{A^L} \times 2^{A^L}\} \quad (17)$$

Gdzie:

A^C – zbiór jednostek, A^A – zbiór możliwych cech agenta, A^S – zbiór możliwych stanów agenta, A^G – zbiór możliwych celów agenta, A^L – zbiór możliwych reguł zachowania agenta, α^A – wektor cech agenta, α^S – wektor określający stan agenta, α^G – lista celów do osiągnięcia przez agenta, α^L – zbiór reguł definiujący indywidualne zachowanie agenta, α^{TL} – zbiór reguł definiujący aktualne zachowanie agenta.

W prezentowanym modelu tłumu zagęszczenie i stres w jakim znajduje się jednostka wpływa na jej sposób przemieszczania i zachowania. Jako podstawę przyjęto teorię proksemiki, wprowadzoną w latach 50-tych przez Edwarda Halla, w której odległość w jakiej znajdują się jednostki od siebie wpływa na relacje (oddziaływanie) między nimi. W modelu przyjęto własną interpretację teorii proksemiki poprzez zdefiniowanie modelu oddziaływań między jednostkami jako:

$$P = (P^L, P^D, P^S, \{ \{ PS_{ij}^{D-L} \}_{i \in P^D} \}_{j \in P^S}, \{ \{ PS_c^d \}_{c \in C} \}_{d \in C^D}, \{ PS_i^{AL} \}_{i \in P^L}) \quad (18)$$

Gdzie:

P^L – zbiór stref oddziaływań, P^D – zbiór poziomów zagęszczeń, P^S – zbiór poziomów stresu (w wersji podstawowej zdefiniowano 3 poziomy stresu związane z sytuacjami: normalnymi, pośpiechu, zagrożenia życia), PS_c^d – zbiór stref oddziaływań dla jednostki znajdującej się w komórce c zorientowanej w kierunku d ,

$$PS_c^d = \{ \{ \{ PS_e^{i,d} \}_{i \in P^L} \} \in (2^C)^{|P^L|}; \forall_{i \in P^L} \exists x, y \in PS_e^{i,d} \exists n \in C^R(x, y) \} \quad (19)$$

$PS_e^{i,d}$ – zbiór komórek należących do strefy oddziaływania i , dla jednostki znajdującej się w komórce c zorientowanej w kierunku d , PS_{ij}^{D-L} – zbiór stref oddziaływań uwzględnianych na poziomie zagęszczenia i przy poziomie stresu j , PS_i^{AL} – zbiór reguł zachowania jednostki względem jednostek znajdujących się w strefie oddziaływania i .

W wersji podstawowej zdefiniowane zostały 3 strefy:

$$PS_c^d = \{ PS_c^{1,d}, PS_c^{2,d}, PS_c^{3,d} \} \quad (20)$$

Gdzie:

$PS_c^{1,d} = \{c\}$ – strefa fizyczna (komórka w której jest jednostka), $PS_c^{2,d} = C^N(c)$ – strefa ruchu, $PS_c^{3,d} = \{ \vec{C}(c, d, 2), \vec{C}(c, d, 3) \} \cup \{ C^N(\vec{C}(c, d, 2)) \cap C^N(\vec{C}(c, d, 1)) \}$ – strefa swobodnego ruchu.

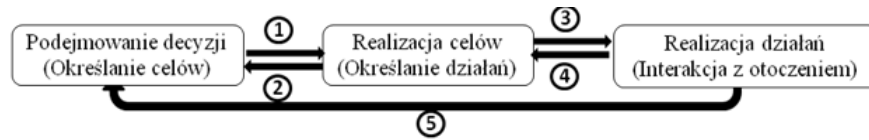
Zachowanie jednostki

W prezentowanym rozwiązaniu zachowanie jednostek w tłumie odwzorowano przy wykorzystaniu systemu regułowego (ekspertowego) i założeniach: każdy agent wykorzystuje zbiór reguł w celu podejmowania decyzji co robić dalej i wykonywania odpowiednich działań, zbiór reguł zmienia się w zależności od zagęszczenia i poziomu stresu, każda z reguł powinna mieć określony priorytet, reguły dla „mniejszych” stref oddziaływania mają wyższy priorytet. Model zachowań można przedstawić jako:

$$A^B = (E, A^L, A^{GL}, A^G, A^D, A^{ACT}, A^A, A^S, A^C, P, F^{TL}, F^D, F^G, F^{ACT}) \quad (21)$$

Gdzie:

$A^{GL} \subseteq A^L$ – zbiór reguł zachowania dla wszystkich agentów, A^D – zbiór możliwych decyzji agenta, A^{ACT} – zbiór możliwych działań agenta, $F^{TL}: A^C \times E \rightarrow 2^{A^L}$ – funkcja określająca aktualny zbiór reguł zachowania agenta, $F^D: A^C \times E \rightarrow A^D$ – funkcja określająca decyzję podejmowaną przez agenta, $F^G: E \times A^C \times A^D \rightarrow 2^{A^G}$ – funkcja określająca cele do realizacji przez agenta, $F^{ACT}: EC \times A \rightarrow A^{ACT}$ – funkcja określająca działanie agenta. Podstawowe fazy składające się na zachowanie agenta przedstawiono na diagramie:



Rys. 2 Diagram zachowania agenta

Fig. 2 Agent behavior diagram

Proces określania zachowania jednostki podzielono na dwie części. W pierwszej jednostka (agent) analizuje stan otoczenia i określa cel jaki chce osiągnąć. W drugiej określone jest rzeczywiste, „widoczne” działanie jednostki. Główne działania jednostek to: przemieszczanie się, oczekiwanie, interakcja z obiektem, interakcja z jednostką (zdobywanie informacji, formowanie grupy, itp.).

Przemieszczanie się tłumu

Do wyznaczenia najlepszej trasy na poziomie decyzyjnym został wykorzystany zmodyfikowany algorytm wyznaczania najkrótszej drogi w grafie. Jednostka, w zależności od znajomości otoczenia i swoich cech z określonym prawdopodobieństwem, wybiera sposób wyznaczenia najlepszej trasy. W procesie decyzyjnym każda jednostka a^c znajdująca się w wierzchołku x i mająca jako cel wierzchołek y wybiera trasę przemieszczania (kolejne wierzchołki) zgodnie z funkcją:

$$F^{DEC-R}(a^c, x, y) = \begin{cases} r^{min} & \text{dla } p_1: F^{COST-R}(r^{min}) = \min_{l \in G^R(x,y)} F^{COST-R}(l) \\ r^{med} & \text{dla } p_2 \\ r^{CSP} & \text{dla } p_3 \end{cases} \quad (22)$$

gdzie:

$F^{DEC-R}: A^c \times W \times W \rightarrow R^G$ - funkcja określająca „najlepszą” trasę przemieszczania się jednostki (dla uproszczenia przedstawiono tylko 3 możliwe przypadki określające sposób wyboru trasy), r^{min} - najlepsza trasa dla przypadku p_1 , w którym jednostka na podstawie znajomości otoczenia i zagęszczenia wybiera sama trasę, $F^{COST-R}: R^G \rightarrow R$ - funkcja określająca koszt przejścia trasy (uwzględnienie dla każdego wierzchołka kary za: zatłoczenie, dużą liczbę wierzchołków sąsiadujących, znajomość przez jednostkę, zagrożenie i odległość), r^{med} - najlepsza trasa w przypadku p_2 , w którym jednostka porusza się za tłumem nie znając otoczenia, r^{CSP} - najlepsza trasa w przypadku p_3 , w którym jednostka porusza się po znanej, odgórnie ustalonej trasie (np.: jedyna dostępna trasa).

W fazie działania, gdy jednostka określiła jakie wierzchołki należy pokonać, aby dostać się do celu, przemieszczanie odbywa się pomiędzy przyległymi, niezajętymi przez inne jednostki komórkami. Sposób wyznaczania trajektorii ruchu (kolejnych komórek) oparty jest w wersji podstawowej o zmodyfikowaną metodę pól potencjałów z normą euklidesową. Algorytm wyznaczania potencjałów przedstawiono w tabeli:

Tab. 1 Metoda pól potencjałów

Tab. 1 Potential fields method

<p>Dla każdego wierzchołka $x \in W$:</p> $c \in F^{CG}(x) \quad F^{PFLD}(c, x) = 0$ $d \in \bigcup_{y \in W \setminus G^N(x)} F^{CG}(y) \quad F^{PFLD}(d, x) = \infty$
<p>Dla każdego wierzchołka $y \in G^N(x)$:</p> $X^P = F^{CG}(x), \quad X^K = F^{CG}(y)$
<p>Dopóki $X^K \neq \emptyset$</p> $X^N = \bigcup_{d \in X^K} (C^N(d) \cap X^K) \setminus X^P$ $c \in X^N \quad F^{PFLD}(c, x) = \min_{e \in C^N(c) \cap X^K} (F^{PFLD}(e, x) + F^{PFLD}(c, e))$ $X^K = X^K \setminus X^N, \quad X^P = X^P \cup X^N$

gdzie:

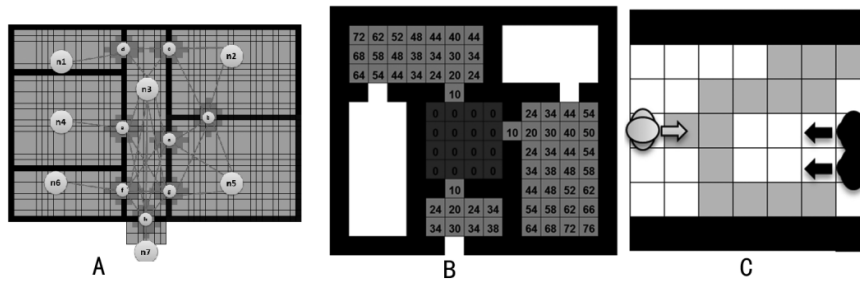
$F^{PFLD}(c, x)$ - potencjał komórki c w kierunku wierzchołka x ,

$c = (x_c, y_c, z_c), e = (x_e, y_e, z_e)$,

$$F^{PFLD}(c, e) = \begin{cases} 1.0 + 0.4 * F^{PFLD-SM}(c, e) & \text{dla } |x_c - x_e| + |y_c - y_e| \geq 1 \\ 1.0 & \text{w p.p.} \end{cases} \quad (23)$$

$F^{PFLD}(c, e)$ - funkcja określająca odległość między komórkami c i e , $F^{PFLD-SM}$ - funkcja wygładzająca, określająca wpływ odległości od wierzchołka i liczby komórek sąsiadujących na atrakcyjność komórki.

Oprócz przemieszczania się na kolejne niezajęte komórki o niższym potencjale, każda jednostka poruszając się uwzględnia: aktualny stan (zagęszczenie i poziom stresu) i odpowiadającą mu przestrzeń interpersonalną, którą chce zachować niezajętą. W aktualnej wersji modelu uwzględniono również algorytm prognozowania zajętości komórek, który pozwala jednostce „przewidzieć” i uniknąć możliwej kolizji z obiektem ruchomym (mechanizm ten pozwala odwzorować tak zwane „zjawisko tunelowania” w ruchu wielokierunkowym pieszych).



Rys. 3 Model otoczenia na poziomie decyzyjnym (A), metoda pól potencjałów (B), metoda prognozowania położenia (C)

Fig. 3 Coarse network model (A), potential fields method (B), position prediction method (C)

3 Eksperymenty

Eksperymenty symulacyjne zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu autorskiego oprogramowania, które zostało skonstruowane na bazie opisanego w poprzednim rozdziale modelu. Jako obiekt zainteresowań wybrano scenariusze: ewakuacji ludzi z budynku z windami oraz ewakuacji na stacji metra. W obu przypadkach wykorzystano ten sam rozkład cech jednostek w badanym tłumie. Podstawowa charakterystyka tłumu została przedstawiona w tabeli:

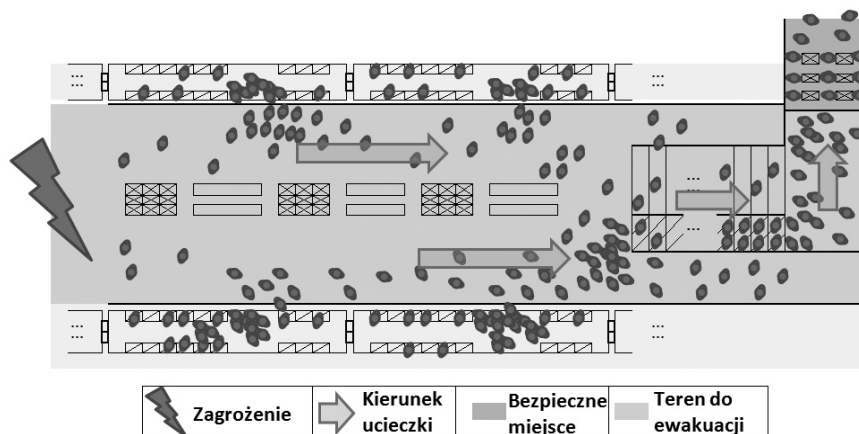
Tab. 2 Główne cechy tłumu

Tab. 2 Main crowd attributes

Cecha	Średnia	Cecha	Wartość
Prędkość maksymalna	2.0 m/s	Rozmiar tłumu	100 – 3000
Prędkość preferowana	1.1 m/s	Znajomość otoczenia	20%-90%
Czas reakcji	8.0 s	Proporcja rozmiaru grup	70%/20%/5%/+ 1/2/3/+
Czas interakcji	0.5 s	Przestrzeń interpersonalna	1.0 - 1.5 m

W eksperymencie związanym z ewakuacją budynku, w którym są windy, przyjęto jako cel zbadanie wpływu obecności i dostępności dodatkowych środków transportu na przebieg ewakuacji. Głównym elementem, który został zbadany to wpływ liczby osób chcących skorzystać z wind oraz awaryjność wind na przebieg ewakuacji.

W scenariuszu związanym z wystąpieniem zagrożenia na stacji metra przyjęto jako cel zbadanie możliwości bezpiecznego opuszczenia obiektu na wypadek sytuacji kryzysowej. W badanym scenariuszu w pierwszej fazie przeprowadzona jest symulacja normalnego ruchu na stacji metra i w dowolnym momencie poprzez interakcje użytkownika uruchomienie „alarmu” informującego o sytuacji kryzysowej przy jednym z wyjść ze stacji. W efekcie pasażerowie metra muszą opuścić stację wykorzystując tylko jedno wyjście. Symulacje zostały przeprowadzone dla różnych wybranych intensywności ruchu na stacji metra i różnej liczby osób w wagonach. Ciekawym eksperymentem jest symulacja opuszczania metra uwzględniająca sterowanie ruchem poprzez zwalnianie (otwieranie) wagonów z pasażerami w określonych chwilach.

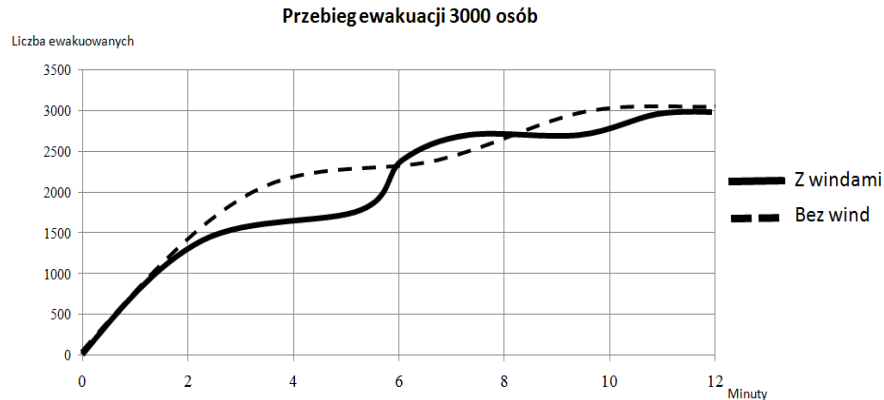


Rys. 4 Plan eksperymentu: zagrożenie na stacji metra

Fig. 4 Experiment plan: danger on metrostation

4 Wyniki

Na poniższych wykresach zamieszczone zostały wyniki eksperymentów dla wybranych



charakterystyk:

Rys. 5 Wykres 1: ewakuacja budynku

Fig. 5 Plot 1: building evacuation

5 Podsumowanie

W pracy przedstawiono model pozwalający na badanie zjawisk przemieszczania się tłumu w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu. Zaprezentowane autorskie rozwiązanie w postaci hybrydowego modelu otoczenia pozwala na szybkie przejście między poziomami decyzyjnymi i działania, a tym samym pełniejszą symulację zjawisk jakie mogą zachodzić w prawdziwym tłumie. Uwzględnienie zagadnienia proksemiki pozwala na dokładniejsze odwzorowanie zachowania tłumu o mniejszych zagęszczeniach i rozmiarach a mechanizm zredukowania stref interpersonalnych do minimum w dużym zagęszczeniu nie wpływa negatywnie na symulację dużych tłumów. Przedstawione eksperymenty i wyniki pozwalają stwierdzić, że model i symulator mogą być doskonałym narzędziem do badania przystosowania obiektów aglomeracji do przemieszczania się dużych grup ludzi oraz analizy zachowania tłumu w sytuacjach kryzysowych.

Literatura

1. J.J. Fruin.: *Pedestrian Planning and Design*, Elevator World Inc, Alabama, 1987
2. G.K. Still, *Crowd Dynamics*, PhD. Thesis, University of Warwick, UK, 2000.
3. M. Schreckenberg, *A Cellular Automaton Model for Crowd Movement and Egress Simulation*, PhD. Thesis, University Duisburg-Essen, 2003.
4. A. Najgebauer, R. Antkiewicz, J. Rulka, Z. Tarapata, M. Kapałka.: *Zagrożenia dla porządku i bezpieczeństwa publicznego. Modele zagrożeń aglomeracji miejskiej wraz z systemem zarządzania kryzysowego na przykładzie miasta stołecznego Warszawy*, pod redakcją: Andrzeja Najgebauera Warszawa, 2009, str. 563-584 ISBN 978-83-61486-22-0

5. M. Kapałka, *Modelowanie i symulacja przemieszczania się tłumów*, master thesis, WAT, Warsaw, 2006.
6. M. Kapałka.: *The fine-coarse network model for simulating crowd behavior*. Biuletyn Instytutu Systemów Informatycznych, Nr 5, 31-36 (2010).

Streszczenie

W pracy został opisany autorski model i symulator tłumy pozwalający badać zachowanie tłumy w dynamicznym otoczeniu. Praca została podzielona na dwie części. W pierwszej części przedstawiono model matematyczny: otoczenia, jednostki i tłumy oraz podstawowe algorytmy symulacyjne. W drugiej części przedstawione zostały wyniki eksperymentów dla scenariuszy: ewakuacji budynku z windami oraz zagrożenia na stacji metra.

Simulation of crowd behavior in dynamic environment

Summary

This work presents a novel approach to the crowd behavior modeling and simulation in dynamic environment. In this paper we introduce in first part mathematical model of: environment, pedestrian, crowd and main simulation algorithms. In second part we presents experiments conducted with created simulator: evacuation building with elevators and danger in metro station.