

Michał KAPAŁKA

Wojskowa Akademia Techniczna
ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa
E-mail: mkapalka@wat.edu.pl

Symulacyjne wsparcie systemów kierowania ruchem pieszych w obiektach publicznych

1 Wprowadzenie

Bezpieczeństwo i komfort ludzi poruszających się jest jednym z kluczowych elementów w obiektach i miejscach publicznych. Ważne jest, aby było ono zapewnione również w sytuacjach nietypowych, w których mogą pojawić się dodatkowe czynniki zmieniające warunki przemieszczania się (np.: zwiększone zagęszczenie osób, zagrożenie życia, panika lub blokada znanej drogi). Często istniejące systemy kierowania ruchem pieszych, zarówno te statyczne (np.: znaki ewakuacyjne, bramki, bariery), jak i dynamiczne (np.: przeszkolony personel, służby porządkowe, dynamiczne znaki), nie spełniają swoich funkcji w sytuacjach odbiegających od wzorcowej (np. statyczne znaki ewakuacyjne mogą w niektórych sytuacjach prowadzić do źródła zagrożenia). W pracy przedstawiona zostanie koncepcja zintegrowanego dynamicznego systemu kierowania ruchem pieszych w obiektach publicznych (z uwzględnieniem kluczowych elementów i przykładów zastosowań) oraz symulacyjny model zachowania tłumu jako integralna część takiego systemu. Integracja w systemach kierowania ruchem pieszych związana jest z koniecznością akwizycji i przetwarzania danych z innych systemów (np.: alarmy, czujniki, fotokomórki), a dynamizm wiąże się z koniecznością reakcji systemu na zmieniające się warunki (np. pojawienie się dodatkowego zagrożenia w czasie ewakuacji). Symulacyjny model tłumu w przyjętym rozwiązaniu służy jako nieinwazyjne i wydajne narzędzie do badania i testowania poprawności działania możliwych podsystemów (np.: planowania akcji ratunkowych podczas ewakuacji, planowania eskorty osób przez tłum, optymalizacji ewakuacji). Omówione zostaną kluczowe elementy modelu istotne w kontekście prezentowanego zastosowania: dyskretny hybrydowy model otoczenia pozwalający na integrację ze strefowymi modelami zagrożeń (np.: pożar, zadymienie), wykorzystanie własnej interpretacji zagadnienia proksemiki oraz automatów komórkowych przy symulacji różnych zagęszczeń w tłumie oraz podejście agentowe przy modelowaniu jednostek, pozwalające na odwzorowanie autonomiczności działania oraz różnych ról w tłumie (np.: pieszy, strażak, nauczyciel w szkole, opiekun dzieci). Zostaną również przedstawione możliwe obszary zastosowań omówionego rozwiązania poparte wykonanymi eksperymentami symulacyjnymi.

2 System kierowania ruchem pieszych

Obecnie większość metod kierowania ruchem pieszych w obiektach publicznych ma charakter statyczny i sprowadza się głównie do: oznakowania statycznych dróg ewakuacyjnych oraz mechanicznych ograniczników (barierki, tunele ruchu, systemy schodów ruchomych i wind, drzwi obrotowych itp.). Są to metody sprawdzające się

jedynie w typowych warunkach. Jednak świadomość zagrożeń [1,2] związanych z niewłaściwym przygotowaniem otoczenia i osób w miejscach publicznych powoduje, że coraz więcej osób widzi potrzebę konstruowania dynamicznych i inteligentnych metod zarządzania ruchem w obiektach publicznych. Eksperti ds. bezpieczeństwa zgodnie wskazują, że nowoczesne rozwiązania w tym zakresie powinny brać pod uwagę zmieniające się warunki w otoczeniu i wskazywać bezpieczne metody reagowania na sytuacje nietypowe, wpływające w znacznym stopniu na zmianę charakteru ruchu pieszych, np. nieplanowaną ewakuację, pożar, zadymienie, panikę. Na rysunku nr 1 przedstawiono podstawowe komponenty dynamicznego systemu kontroli ruchu pieszych w obiektach publicznych.



Rys. 1. Komponenty systemu zarządzania ruchem pieszych

Fig. 1. Crowdcontrol system components

Podstawowe funkcje systemu zarządzania ruchem pieszych w obiektach publicznych związane są z zapewnieniem komfortu (w sytuacjach codziennych) i bezpieczeństwa (w sytuacjach wyjątkowych, jak na przykład pojawienie się zagrożenia) przy wykorzystaniu dynamicznego systemu informowania ludzi, jak mają się przemieszczać. Przykładami metod informowania mogą być: dynamiczny system oznakowań [3], komunikaty głosowe [2] lub wyszkolony personel. System zarządzania ruchem służy jako narzędzie wspomagające wyznaczanie strategii przemieszczania się osób w określonych sytuacjach na podstawie:

- danych statycznych z bazy danych (np: struktura obiektu, charakterystyki biomotoryczne osób, zdefiniowane scenariusze, charakterystyki wzorcowe);
- danych dynamicznych, gromadzonych na bieżąco przez systemy: detekcji zagrożeń (źródła oraz dynamika rozprzetrzenia się zagrożeń) oraz ruchu (podstawowe dane to szczegółowe rozmieszczenie osób w obiekcie);
- przyjętych procedur postępowania oraz metod prognozowania;
- decyzji eksperta.

Rola modelu i symulatora tłumu w systemach kierowania ruchem pieszych wiąże się z koniecznością sprawdzenia poprawności i skuteczności przyjętych metod, procedur, scenariuszy oraz wyznaczanych strategii ruchu. Poprzez wykorzystanie wirtualnego środowiska, symulatora tłumu oraz zagrożeń możliwe jest badanie, testowanie

oraz wyznaczanie optymalnych rozwiązań [3] dla różnych scenariuszy nieinwazyjnymi metodami (często symulacja jest jedyną bezpieczną metodą dla niektórych scenariuszy).

3 Model i symulator tłumu

Jednym z podstawowych założeń modelu i symulatora tłumu jest adekwatne odwzorowanie zachowania oraz przemieszczania się osób w różnych sytuacjach (również z uwzględnieniem takich zachowań, jak dostosowywanie się do wytycznych dynamicznego systemu kierowania ruchem). W przyjętym rozwiązaniu wykorzystano autorski model i symulator tłumu, którego kluczowe cechy pozwalające na efektywne wykorzystanie w systemach zarządzania ruchem to: dyskretny hybrydowy model otoczenia, modelowanie zachowań (indywidualnych i grupowych) dla różnych zagęszczeń w tłumie, integracja z innymi modelami (np: strefowe modele zagrożeń).

Hybrydowy model otoczenia

Otoczenie odwzorowane jest przy użyciu dwóch dyskretnych rodzajów reprezentacji: sieci oraz sieci komórek. Pozwoliło to na niezależne zdefiniowanie mechanizmów związanych z różnymi aspektami przemieszczania i zachowania osób.

Przestrzeń w postaci grafu została wykorzystana do skonstruowania mechanizmów głównie związanych z podejmowaniem decyzji i zmian zachowania osób. Model przestrzeni na poziomie decyzyjnym przedstawiony jest jako $E^C = \langle G, f^C \rangle$, gdzie: $G = \langle W, U \rangle$ - unigraf skierowany bez pętli, $W \in 2^N$ - zbiór wierzchołków, $U \subset W \times W$ - zbiór łuków, $f^C = \langle f_{NN}^C, f_R^C, \dots \rangle$ - zbiór funkcji i relacji związanych z grafem G , $f_{NN}^C: W \rightarrow 2^W$ - funkcja określająca sąsiedztwo (otoczenie wierzchołka), $f_R^C: W^2 \rightarrow R'_N$ - funkcja określająca drogę między parą wierzchołków.

Przestrzeń w postaci sieci komórek została wykorzystana do skonstruowania mechanizmów odwzorowujących przemieszczanie się i interakcję osób z otoczeniem. Model przestrzeni na poziomie działania przedstawiony jest jako $E^F = \langle X, Y, C, C^S, C^D, f^F \rangle$, gdzie: $X, Y \in N$ - wymiary przestrzeni liczone w liczbie komórek, $C = \{ \langle x, y \rangle \in N_+^2 : x \leq X \wedge y \leq Y \}$ - zbiór komórek przestrzeni, $C^S \in 2^N$ - zbiór możliwych stanów komórek, $C^D = \{ \langle x, y \rangle \in \{-1, 0, 1\}^2 \setminus \langle 0, 0 \rangle \}$ - zbiór możliwych kierunków przemieszczania się komórek, f^F - zbiór funkcji i relacji między elementami E^F .

Hybrydowy model otoczenia przyjmuje postać: $E = \langle E^C, E^F, E^O, f^E \rangle$, gdzie: E^O - model zjawisk i obiektów interaktywnych, f^E - zbiór funkcji i relacji między elementami modeli E^C, E^F, E^O .

Model jednostki

Ze względu na sposób odwzorowania osób model ma charakter mikroskopowy. Każda osoba reprezentowana jest przez wirtualnego agenta posiadającego indywidualny zestaw zmiennych, które go opisują. Na rysunku 2 przedstawiono diagram z podstawowymi elementami modelu agenta.



Rys. 2. Model agenta

Fig. 2. Pedestrian agent model

Model agenta zdefiniowany jest jako $P = \langle P^A, P^S, P^G, B \rangle$, w którym: P^A - lista cecha agenta, P^S - wektor stanu agenta, P^G - lista celów, jakie agent „chce” zrealizować, B - model zachowania jednostki. W prezentowanym rozwiązaniu zaproponowano otwarty model zachowań, bazujący na mechanizmie konstruowania wybranych reguł zachowań na potrzeby różnych scenariuszy symulacyjnych. Model ma postać: $B = \langle B^G, B^A, B^P, B^D, B^S, B^R, B^{GR}, B^{IR}, f^B \rangle$, gdzie: B^G - zbiór możliwych celów do zrealizowania, B^A - zbiór możliwych działań, B^P - zbiór stref oddziaływań, B^D - zbiór poziomów zagęszczeń, B^S - zbiór poziomów stresu, B^R - zbiór wszystkich reguł zachowania, B^{GR} - zbiór „globalnych” reguł zachowania (zachowania podobne u wszystkich jednostek, związane na przykład z unikaniem niebezpieczeństw, szukaniem "najkrótszych" dróg, zmianą zachowania w różnych zagęszczeniach), B^{IR} - zbiór indywidualnych reguł zachowania, f^B - zbiór funkcji i relacji między elementami modelu B . Zastosowanie modelu, w którym możliwe jest definiowanie reguł związanych z zachowaniem, daje możliwość konstruowania różnych scenariuszy symulacyjnych i badanie wpływu różnych zachowań na charakterystyki wyjściowe przemieszczania się osób. Podstawowy schemat działania agenta przedstawiono na rysunku nr 3.

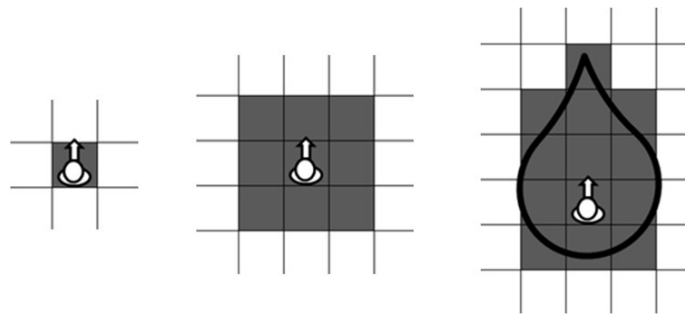


Rys. 3 Schemat działania agenta

Fig. 3 Agent acting diagram

W działaniu agenta wyróżnione zostały 2 tryby. Tryb „normalny” jest aktywny, kiedy jednostka jest bezpieczna (odpowiedni komfort, małe zagęszczenie osób w pobliżu, brak zagrożeń) i realizuje podstawowe cele. Tryb „stresu” związany jest z pojawieniem się niekorzystnych warunków (np. dym, ogień, zatłoczone miejsca), w których agent uruchamia zachowania „instynktowne”, dążące do uniknięcia zagrożeń.

Otwarty charakter modelu i możliwość definiowania nowych zachowań pozwala definiować dedykowane zestawy zachowań dla konkretnych scenariuszy. Podstawowe reguły zachowania związane są z odwzorowaniem rzeczywistego sposobu przemieszczania się osób (z uwzględnieniem: omijania przeszkód i innych osób, szukaniem najlepszych dróg, ruchem z zachowaniem określonej prędkości, charakterystyk wzorcowych[4,5]) i częściowo bazują na badaniach przeprowadzonych przez Helbinga [6], Fruina [7], Raynolda [8], Stilla [9]. Definiowanie własnych zestawów reguł pozwala na symulację osób, które mają różne role w tłumie (np. osoba uciekająca z płonącego budynku, strażak, pojedyncza osoba, rodzice z dziećmi). W modelu wykorzystano własną interpretację zagadnienia stref personalnych (proksemiki [10]), według której w zależności od zagęszczenia zmieniają się całe zestawy zachowań. Zdefiniowane strefy mają charakter ekspercki i mogą być dowolnie zmieniane w celu uzyskania pożądanych charakterystyk bazowych związanych z ruchem. Przykład bazowych stref wykorzystywanych w modelu przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Podstawowe strefy personalne (od lewej: intymna, osobista, publiczna)

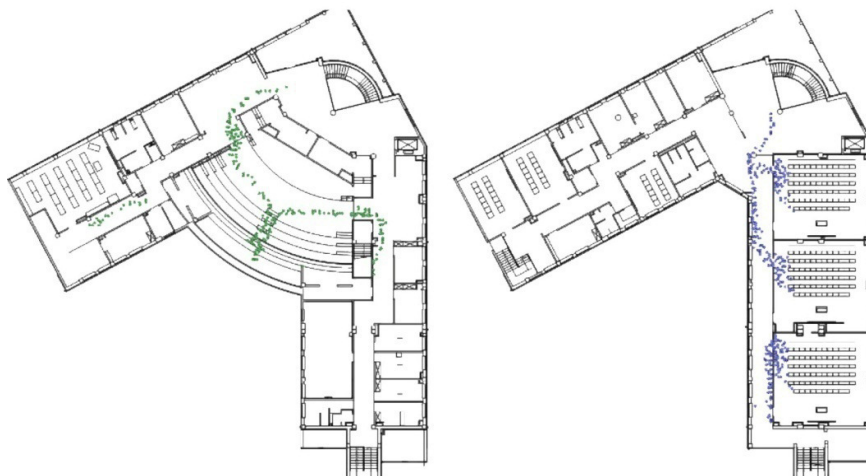
Fig. 4. Basic proxemic spaces (from left: intimate, social, public)

Przedstawione powyżej strefy pozwalają na adekwatne odwzorowanie charakterystyk zgodnych z diagramami fundamentalnymi [4]. Sposób zmian zestawów zachowań bazuje na zastosowanym automacie komórkowym, który w czasie symulacji na bieżąco sprawdza stany komórek sąsiadujących i określa odpowiednią strefę personalną dla danej komórki oraz wymusza negocjację zmiany zestawu reguł zachowania jednostek.

Symulator tłumy

Przedstawiony model został zaimplementowany w języku java. Skonstruowany symulator pozwala na płynne przeprowadzanie symulacji o rozmiarach: 500 tys. jednostek (podstawowe reguły), 10 tys. jednostek (wiele zestawów reguł). W symulatorze dostępne są moduły: wizualizacji 2D oraz 3D, edycji reguł zachowań,

konwersji danych z zewnętrznych strefowych modeli zagrożeń, wizualizacji charakterystyk wyjściowych. Dostępne są 2 tryby symulacji: krokowy (uproszczony, do kalibracji modelu lub tłumów o dużych rozmiarach) i zdarzeniowy.



Rys. 5. Wizualizacja symulacji

Fig. 5. Visualization of simulation

4 Wybrane scenariusze i wyniki eksperymentów

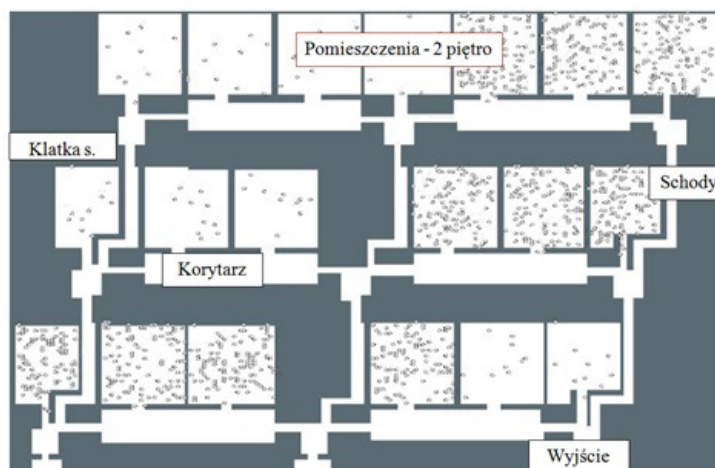
Przedstawiony model tłumy z powodzeniem może być wykorzystany do wsparcia planowania procesów ewakuacyjnych z uwzględnieniem systemu kierowania ruchem uwzględniającego: moduł optymalizacji ewakuacji z uwzględnieniem różnych kryteriów [3,11] oraz systemu dynamicznych oznakowań dróg ewakuacyjnych [3,12]. Inne możliwe zastosowania modelu to: symulacje przemieszczania się tłumy z uwzględnieniem interaktywnych obiektów (windy, schody ruchome, drzwi obrotowe) oraz pojazdów (autobusy, pociągi, metro), symulacje z uwzględnieniem zachowań grupowych (ewakuacje szkół, ruch grup turystów, przemieszczanie się służb porządkowych w czasie imprez masowych, nadzór ruchu grup kibiców), symulacje z uwzględnieniem rozprzestrzeniającego się zagrożenia (np: pożar).

Kalibracja modelu

W przyjętym rozwiązaniu każdy eksperyment poprzedzony jest procesem kalibracji, który służy do odwzorowania wejściowych charakterystyk wzorcowych. Jest to konieczny etap z uwagi na istotny wpływ danych wejściowych związanych głównie z charakterystykami osób (np: rozmiar, wiek, średnie prędkości przemieszczania się). Z uwagi na niedostępność i trudność pozyskiwania szczegółowych charakterystyk przemieszczania się tłumy autorzy wykorzystują diagramy fundamentalne i porównują z nimi wyznaczoną w procesie kalibracji (rys. 6) zależność przepływu od zagęszczenia dla: płaskiego terenu, schodów (ruchu z utrudnieniami), wąskich przejść.

Eksperyment symulacyjny

W ramach testów wykonany został eksperyment symulacyjny, w którym symulator wykorzystano do wyznaczania optymalnego planu ewakuacji w wielopiętrowym budynku. W założeniach przyjęto, że ewakuacja jest wspierana przez system dynamicznych znaków wskazujących „na bieżąco” aktualne drogi ewakuacyjne (zgodnie z założeniami kierunki i topologia dróg ewakuacyjnych mogą się zmieniać w zależności od warunków). Eksperymenty wykonano dla dwóch rozkładów osób w budynku (równomiernego i nierównomiernego). Na rysunku nr 6 przedstawiono strukturę budynku oraz nierównomierne rozmieszczenie osób.



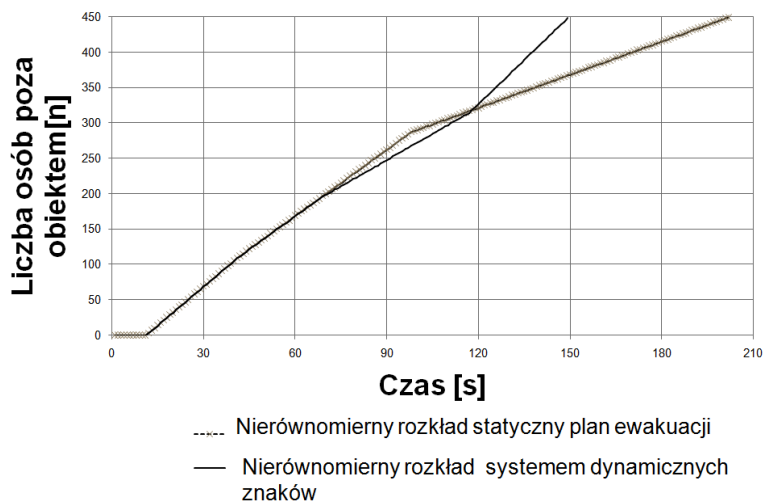
Rys. 6. Struktura obiektu oraz rozkład osób w budynku z dynamiczną ewakuacją

Fig. 6. Building structure and pedestrian positions for dynamic evacuation

Na podstawie przyjętych danych wejściowych oraz kalibracji modelu, w celu dostosowania go do europejskich norm, przeprowadzono eksperymenty, na podstawie których uzyskano obiecujące wyniki:

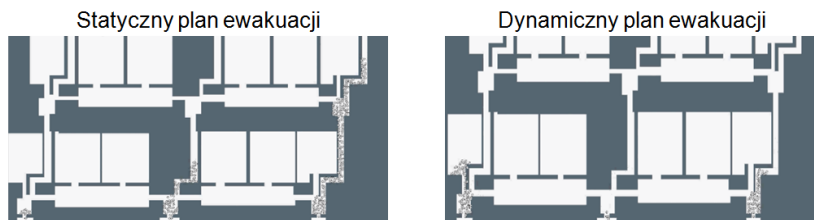
- skrócenie czasu ewakuacji poprzez zastosowanie dynamicznego oznakowania dróg ewakuacyjnych i dostosowywanie tras do aktualnych warunków (zatłoczenie, liczba osób w określonych częściach obiektu) udało się skrócić całkowity czas ewakuacji dla scenariusza, w którym rozmieszczenie osób w budynku było nierównomierne (w przypadku równomiernego rozmieszczenia osób obie symulacje przebiegały podobnie) przyjęto w eksperymencie, że stopień stosowania się osób do dynamicznych znaków wynosi 70%, na rysunku nr 7 przedstawiono wykresy czasów ewakuacji dla statycznej i dynamicznej ewakuacji przy nierównomiernym rozmieszczeniu osób;
- skrócenie czasów oczekiwania w zatłoczonych miejscach poprzez zmianę „statycznych” dróg ewakuacji kierowano ewakuujące się osoby do „dalszych” w sensie odległości, ale „mniej zatłoczonych” klatek schodowych, przez co czas przebywania osób w „tłoku” uległ skróceniu oraz uzyskano lepszą

użyłację klatek schodowych; na rysunku nr 8 przedstawiono porównanie rozkładu osób w końcowej fazie ewakuacji dla obu sytuacji.



Rys. 7. Wyniki ewakuacji

Fig. 7. Evacuationprocessresults



Rys. 8. Porównanie użyczenia klatek schodowych - ostatnia faza ewakuacji

Fig. 8. Comparison of staircases utilization - last phase of evacuation

5 Podsumowanie

Dynamiczne systemy kierowania ruchem pieszych w obiektach publicznych mogą być znaczącym czynnikiem poprawy bezpieczeństwa osób. Niewątpliwie statyczne systemy nie będą w stanie zapewnić bezpieczeństwa w sytuacjach nietypowych i w zmieniających się warunkach. Zastosowanie modelu i symulatora tłumu pozwala w sposób nieinwazyjny testować nowe rozwiązania i systemy, dając wirtualne środowisko i tłum. Takie połączenie pozwala na konstruowanie różnych scenariuszy i sytuacji, które mogłyby się wydarzyć w rzeczywistości. Możliwość kalibracji, charakter modelu otoczenia oraz agentowy model jednostki pozwala na użycie modelu

w różnych obszarach, w których konieczne jest bezpieczne i szybkie przekierowanie ruchu pieszych.

Literatura

1. Human stampedes, http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_human_stampedes
2. Modelling the Jamarat bridge, <http://www.gkstill.com/CV/Projects/Jamarat.html>
3. Cisek M., Kapałka M., Fifth International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, *The use of fine – coarse network model for simulating building evacuation with information system*, Gaithersburg MD 2010
4. Predtetschenski W.M., Milinski A.I.: Personenströme in Gebäuden - Berechnungsmethoden für die Projektierung, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller Köln-Braunsfeld 1971
5. Zhang J., Seyfried A.: Empirical characteristics of different types of pedestrian streams, *Procedia Engineering* 2012
6. Helbing D.: Social force model for pedestrian dynamics, *Physical Review E*, May 1995
7. Fruin J.J.: *Pedestrian Planning and Design*, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, New York 1971
8. Reynolds C.: Flocks, Herds, and Schools: A distributed behavioral model. *Proceedings of SIGGRAPH 1987 in Computer Graphics*, Volume 21, number 4, July 1987
9. Still G.K.: *Crowd Dynamics*, PhD. Thesis, University of Warwick, UK, 2000
10. Hall E.T.: *The hidden dimension*, New York, 1966
11. Cisek M., Kapałka M.: The Evaluation Indicator Problem in Determining Optimal Evacuation Schedule for Selected Adverse Event Scenarios, International Scientific and Technical Conference *Emergency Evacuation of People from Buildings* EMEVAC Warszawa, 2011
12. Cisek M., Kapałka M.: Evacuation Route Assessment Model for Optimization of Evacuation in Buildings with Active Dynamic Signage System, *The Conference in Pedestrian and Evacuation Dynamics PED2014*, 2014

Streszczenie

W pracy został przedstawiony obszar zastosowań autorskiego modelu i symulatora tłumu jako jednego z kluczowych elementów zintegrowanego systemu kontroli i kierowania ruchem pieszych w obiektach publicznych, zaprezentowana została koncepcja systemu kierowania ruchem pieszych jako narzędzia wpływającego w istotny sposób na komfort i bezpieczeństwo ruchu pieszych, zwłaszcza w sytuacjach nieoczekiwanych, sposób wykorzystania oraz kluczowe elementy modelu i symulatora w kontekście takiego systemu oraz wybrane scenariusze i wyniki eksperymentów symulacyjnych.

Słowa kluczowe: modelowanie tłumu, system kierowania ewakuacją, symulacja tłumu

Simulation of crowd behavior in dynamic environment

Summary

This work introduces the field of application of self-constructed crowd model and simulator as a key component of integrated crowd control system in public areas. We present in this paper: concept of pedestrian traffic control system as a tool for improving people safety and comfort during movement especially in unexpected situations, key elements of crowd model and simulator and selected scenarios with experimental results.

Keywords: crowd modeling, crowd control system, crowd simulation