



PORTFOLIO:

Koncepcja systemu do wspomagania projektowania obiektów użyteczności publicznej pod kątem bezpiecznego i optymalnego przepływu ludzi.

Autorzy: Robert Lubaś, Jarosław Wąs, Marcin Mycek, Jakub Porzycki

Centrum Inteligentnych Systemów Informatycznych Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
budynek C-2 pokój 426 tel.: 12 617 44 53 www.isi.agh.edu.pl isi@agh.edu.pl



Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Wspomaganie projektowania budynków pod kątem optymalnego przepływu ludzi

Robert Lubaś, Jarosław Wąs, Marcin Mycek, Jakub Porzycki

AGH University of Science and Technology
Institute of Applied Computer Science
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland
rlubas, jarek, mycek, porzycki@agh.edu.pl

1 Wprowadzenie

Projekt obejmuje stworzenie metodologii mającej na celu wspomaganie procesu projektowania obiektów użyteczności technicznej pod kątem bezpieczeństwa i komfortu przebywających i przemieszczających się tam osób.

Zagadnienie to sprowadza się więc do *określenia w jaki sposób konkretne rozwiązania architektoniczne w obiektach użyteczności publicznej (przykładowo: umiejscowienie konkretnych pomieszczeń, rozmieszczenie korytarzy, wyjść i dróg ewakuacyjnych) wpływają na bezpieczeństwo i komfort przebywających tam ludzi oraz stworzenie narzędzi informatycznych, które umożliwią szybkie testowanie rozwiązań architektonicznych ze względu na charakterystyki przepływu użytkowników.*

2 Komputerowe wspomaganie projektowania budynków

Obecnie projektowanie obiektów użyteczności publicznej bazuje przede wszystkim na wiedzy, doświadczeniu i intuicji architektów, chociaż od pewnego czasu obserwuje się tendencję do coraz szerszego wykorzystywania komputerowego wspomaganie projektowania. Sam proces projektowania obiektu wymaga przestrzegania obowiązujących norm budowlanych i warunków technicznych. Przepisy te regulują wszystkie kluczowe aspekty techniczne związane z projektowaniem danego typu obiektu. Szereg przepisów dotyczy bezpieczeństwa osób, które będą korzystały z projektowanego obiektu i szczegółowych aspektów takich jak rozmieszczenie dróg i przejść ewakuacyjnych, określenie przepustowości wyjść, określenie odporności ogniowej elementów nośnych czy zastosowanie wentylacji oddymiającej na wypadek pożaru oraz wiele, wiele innych.

Na dzień dzisiejszy architektki mają możliwość korzystania z narzędzi wspomagających proces projektowania np. efektywnych energetycznie budynków czy też narzędzi szacujących rozprzestrzenianie się ognia i dymu.

Jeżeli chodzi o narzędzia ogólnego przeznaczenia to w Polsce największą popularnością cieszy się program AutoCad czy też coraz częściej używany przez projektantów program ArchiCad. EcoDesigner jest dodatkiem to oprogramowania ArchiCad wspomagającym projektowanie budynków efektywnych energetycznie.

Brak jest natomiast rozwiązań wspomagających projektowanie budynków użyteczności publicznej pod kątem wspomnianych wcześniej optymalnych parametrów transportowych pieszych oraz komfortu użytkownika obiektu. Przykładowymi parametrami transportowymi są: średnia prędkość opuszczania budynku, czas wyjścia z budynku, gęstość pieszych przy wyjściach ewakuacyjnych czy przepływ ludzi.

Wartym podkreślenia jest fakt, iż mimo ścisłego przestrzegania aktualnych norm, architekt wciąż może zaprojektować budynki zróżnicowane pod względem bezpieczeństwa procesu swobodnego wyjścia czy ewakuacji. Brakującym ogniwem na etapie projektowania obiektu jest zastosowanie narzędzi symulacyjnych, które umożliwią bieżące testowanie tworzonego projektu pod kątem bezpieczeństwa i komfortu przebywających w nim ludzi.

Zasadniczym celem niniejszego projektu jest więc stworzenie narzędzia do wspomagania projektowania pod kątem optymalnych parametrów transportowych użytkowników obiektu oraz zapewnienia maksymalnego komfortu użytkownika obiektu pod względem organizacji przestrzeni dostępnej dla pieszych.

3 Ruch pieszych

Kluczowym elementem w symulacji poruszających się osób jest stworzenie wiarygodnego modelu dynamiki i zachowań pieszych, który następnie podlega restrykcyjnej walidacji. Jest to proces obejmujący zarówno ilościową i jakościową analizę wyników symulacji. Analiza jakościowa bierze pod uwagę występowanie w tłumie szeregu zjawisk kolektywnych takich jak:

- **Zakleszczenia** - występujące w sytuacji, gdy grupa osób przestaje się poruszać w wyniku wzajemnego zablokowania sobie drogi mówimy o zakleszczeniu. Sytuacja taka najczęściej występuje przy zwiężeniach, ale również przy spotkaniu się dwóch grup pieszych przemieszczających się w przeciwnych kierunkach. Czas trwania takiego zjawiska i częstotliwość jego występowania zależy przede wszystkim od szerokości ewentualnego zwiężenia oraz gęstości tłumu w którym utworzyło się zakleszczenie.
- **Formowanie się ścieżek ruchu** - dla mas ludzkich poruszających się tym samym kanałem transportowym obserwujemy formalnie się ścieżek ruchu - linii/pasów osób przemieszczających się w tym samym kierunku. Ilość takich pasów i ich szerokość zależy ściśle od szerokości całego przejścia oraz od gęstości tłumu. O ile ilość/łączna szerokość takich struktur jest w miarę stabilna o tyle ich wzajemne rozmieszczenie nie jest zawsze takie samo, mocno zależy od warunków początkowych i może znacząco zmieniać się w czasie.
- **Fale gęstości** - dla tłumów o bardzo dużej gęstości (powyżej 7 osób na metr kwadratowy) obserwujemy praktyczną analogię do przepływu fizycznej cieczy. W takiej „ludzkiej cieczy” podobnie jak w rzeczywistych cieczach, propagują się fale gęstości - szybko w stosunku do normalnego ruchu pieszego przemieszczające się zagęszczania i rozrzedzenia tłumu.

Obserwuje się również wiele innych fenomenów, ale ich dokładny opis nie jest celem niniejszego artykułu.

Przewidywanie ruchu pieszych jest skomplikowanym procesem. Pojedyncza osoba zachowuje się w relatywnie prosty sposób i w określonych warunkach możemy prognozować jej położenie w przyszłości z dużą pewnością. Niestety, gdy nie mówimy o pojedynczym pieszych, a o grupach pieszych albo wręcz tłumie - opis i przewidywanie ruchu takiego zespołu osób staje się znacząco trudniejsze. W tym celu podejmowane są próby metodycznego opisu ruchu pieszych w sposób bardziej sformalizowany, tak aby możliwe było symulowanie i prognozowanie ich zachowania.

3.1 Trójpoziomowy model decyzyjny ruchu pieszych

Działania podejmowane przez pieszych podczas poruszania się można podzielić na trzy poziomy (Rys. 1) w celu ułatwienia opisu i analizy zachowania.



Rysunek 1. Trójpoziomowy model decyzyjny ruchu pieszych.

Poziom strategiczny opisuje najogólniejsze cele pieszego - dokąd zmierza, gdzie chciałby się znaleźć - np. „Chciałbym wyjść z tego budynku.”

Poziom taktyczny opisuje podejmowane szczegółowe decyzje realizujące cele poziomu strategicznego - np. „Aby wyjść z tego budynku zejść na parter awaryjną klatką schodową i wyjść tylnym wyjściem.”

Poziom operacyjny - opisuje wykonywane proste czynności przez pieszych - w jaki sposób pieszy obchodzi przeszkody i reaguje na innych pieszych.

Poziom strategiczny oraz taktyczny są poziomami świadomymi, na które mamy wpływ przez odpowiednie oznakowanie dróg ewakuacyjnych etc. Na poziom operacyjny nie mamy zazwyczaj bezpośredniego wpływu, zależy on jedynie od lokalnego otoczenia pieszego i to on podlega modelowaniu.

4 Modelowanie ruchu pieszych

Metody komputerowe symulacji tłumy ludzi dzielą się w zależności od przyjętego podejścia [6]. Można wymienić następujące najważniejsze kategorie modeli (za [11]):

Mikroskopowe i makroskopowe – w modelach mikroskopowych każda z osób jest rozpatrywana indywidualnie (każda z osób może mieć zdefiniowany, indywidualny zestaw cech), z kolei w modelach makroskopowych rozpatrywany jest wyłącznie strumień pieszych z uśrednionymi parametrami prędkości, gęstości itd. (jak makroskopowe modele Paulsa czy Hendersona).

Dyskretne i ciągłe – najważniejsze zmienne (ang. variables) opisujące dynamikę tłumu jak czas, przestrzeń i zmienne stanu (np. prędkość) mogą być dyskretne lub ciągłe.

Deterministyczne i stochastyczne – algorytmy modeli dynamiki tłumu mogą mieć probabilistyczny lub deterministyczny charakter.

Bazujące na regułach oraz bazujące na siłach – piesi w symulacji komputerowej mogą opierać się albo na zestawie zdefiniowanych reguł działania pieszych (przykładem są tu modele bazujące na automatach komórkowych), albo na wyliczaniu wypadkowej siły działającej na pieszego (przykładem jest tu metoda Social Force opierająca się na dynamice molekularnej).

Dużej i małej dokładności odwzorowania – (ang. high and low fidelity) modele mogą uwzględniać różne poziomy dokładności i złożoności podejmowanych działań przez pieszych. Modele o dużej dokładności odwzorowania uwzględniają dużą liczbę parametrów modelu. Należy podkreślić, że duża liczba parametrów modelu nie gwarantuje lepszych efektów odwzorowania rzeczywistej ewakuacji.

Kategorie te przedstawiono w tabeli (Tab. 1)

Dokładny	↔	Ogólny
Dyskretny	↔	Ciągły
Numeryczny	↔	Analityczny
Stochastyczny	↔	Deterministyczny
Ilościowy	↔	Jakościowy
Makroskopowy	↔	Mikroskopowy

Tablica 1. Klasyfikacja modeli dynamiki tłumu

Przyjrzyjmy się teraz klasyfikacji ze względu na podejście (makroskopowe vs. mikroskopowe)

- Modele makroskopowe - charakteryzujące się bardzo krótkim czasem obliczeń dla budynków praktycznie dowolnego rozmiaru.
- Modele mikroskopowe - dające zdecydowanie dokładniejsze wyniki niż modele szybkie, ale będące wolniejsze w przypadku dużych obszarów symulacji.

Poniżej zostaną pokrótce opisane wybrane najbardziej charakterystyczne modele z każdej grup.

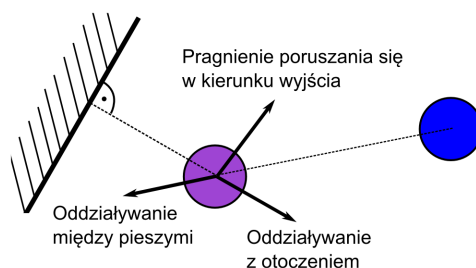
4.1 Modele makroskopowe

Spśród modeli szybkich, szczególnie zasługuje na wspomnienie **model hydrodynamiczny**, w którym tłum opisujemy jako ciecz [8] o trochę nietypowych

właściwościach (np. płynie zawsze w stronę wyjścia, jest częściowo nieściśliwy tzn. unika powstawania zbyt dużych zagęszczeń). Taki opis motywowany jest dwoma faktami. Po pierwsze dla dużych gęstości tłum w swoim zachowaniu bardzo przypomina ciecz, po drugie na etapie analizy bardziej złożonych scenariuszy wygodniej jest operować w kontekście gęstości tłumy, a nie położenia pojedynczych pieszych. Symulacje przy użyciu tego modelu są bardzo szybkie, lecz ze względu na operowanie uśrednionym opisem tłumy nie zawsze bardzo dokładne.

4.2 Modele mikroskopowe

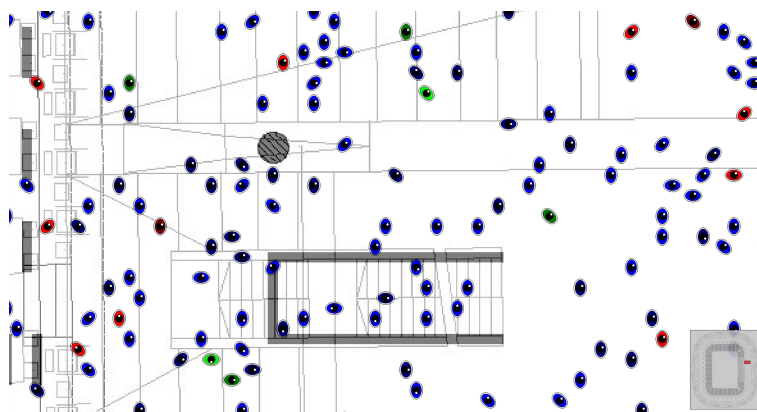
Model sił socjalnych (Social Force) bazuje na prostej Newtonowskiej obserwacji - jeżeli ciało zmienia prędkość, lub kierunek swojego ruchu, działa na nie niezerowa siła wypadkowa. W przypadku pieszych prowadzi to do opisu interakcji pomiędzy pieszym, a innymi pieszymi i otoczeniem jako pewnych sił odpychających nazywanych *siłami socjalnymi* [5]. Podobnie za pomocą siły opisujemy zamiar pieszego poruszania się w pewnym kierunku z zadaną prędkością (patrz Rys. 2). Przy takim opisie symulacja polega na wyznaczeniu trajektorii pieszych na podstawie równań ruchu.



Rysunek 2. Model sił socjalnych.

Model odległości społecznych (Social Distances) bazuje na mariażu dwóch konceptów - teorii proksemiki oraz automatu komórkowego [9]. Teoria odległości społecznych (proksemiki) E.T. Halla opisuje jak ludzie dzielą przestrzeń interpersonalną na podobszary do których dopuszczają albo nie inne osoby zależnie od wzajemnych relacji [4]. Rozmiar tych przestrzeni może zależeć od aktualnego stanu i motywacji danej osoby.

Automat komórkowy to system pojedynczych komórek ułożonych w pewien regularny układ np. szachownicy. Każda komórka może znajdować się w pewnym stanie z puli dopuszczalnych stanów - w naszym przypadku zawierać pieszego o pewnych parametrach poruszającego się w określonym kierunku [1, 7, 10]. W każdej chwili stan komórek w automacie jest aktualizowany na podstawie stanu ich bezpośrednich sąsiadów. Pieszy przejdzie do sąsiadującej komórki o ile będzie ona wolna i nie zbliży się za bardzo do innych pieszych. Taki delikatnie uproszczony



Rysunek 3. Symulacja ruchu pieszych na stadionie przy użyciu modelu odległości socjalnych.

opis tłumu pozwala na znaczne przyspieszenie obliczeń w stosunku do modelu sił socjalnych, przy zachowaniu bardzo dużej realistyczności wyników.

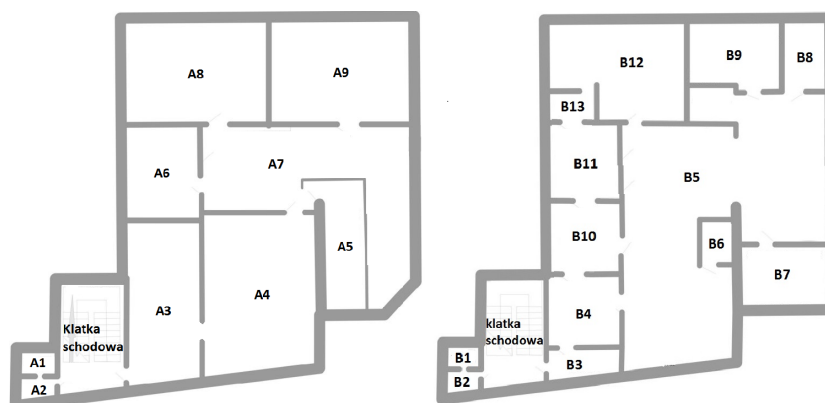
5 Grafowa reprezentacja budynków

Standardowa sposób przedstawiania budynków, za pomocą planów architektonicznych bardzo dobrze sprawdza się jako metoda przekazania informacji o szczegółach konstrukcji budynku pomiędzy ludźmi (np. architektem i wykonawcami) Jednak przeprowadzenie komputerowej analizy i modelowania zachowań pieszych na tego typu reprezentacji budynku jest trudne.

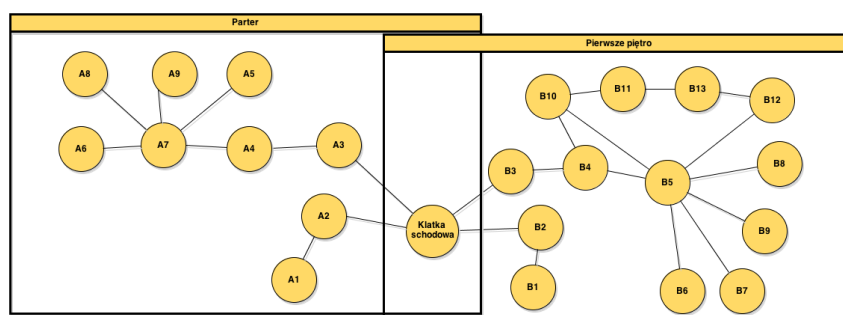
W prezentowanym rozwiązaniu klasyczny sposób reprezentacji budynków, za pomocą mniej lub bardziej dokładnych planów uzupełniony jest reprezentacją grafową. W podstawowej wersji tworzenia grafu reprezentującego budynek, przyjmuje się poniższe zasady:

- każdemu pomieszczeniu odpowiada węzeł grafu,
- każde drzwi w budynku są krawędzią,
- ponadto do każdego elementu grafu(krawędzi lub węzła) może być przypisany zestaw parametrów.

Parametry w grafie służą głównie do przechowywania informacji o geometrii pomieszczenia oraz elementach wyposażenia mogących mieć wpływ na proces ewakuacji - np. systemie wentylacyjnym. Informacje te są wymagane do sprawdzenia zgodności budynku z normami oraz do prawidłowego modelowania zachowań pieszych. Na wyższych poziomach ogólności poszczególne węzły w grafie, mogą reprezentować nie pojedyncze pomieszczenia, ale grupy pomieszczeń - np. pokoje połączone jednym korytarzem.



Rysunek 4. Uproszczony plan architektoniczny dwukondygnacyjnego budynku.



Rysunek 5. Grafowa reprezentacja budynku przedstawionego na poprzednim rysunku.

Reprezentacja grafowa jest znacznie bardziej elastyczna. Jest ona skalowalna wszcz - pozwala na zapis małej i dużej liczby pomieszczeń w strukturze zbudowanej na tych samych zasadach. Co ważniejsze umożliwia skalowanie wgląd, rozpatrywanie struktury budynku na różnych poziomach ogólności, od pojedynczego pomieszczenia ze wszystkimi detalami, budynku jako całości, a nawet kompleksu budynków. W takiej reprezentacji znacznie łatwiejsze jest wyszukiwanie najważniejszych tras ewakuacyjnych.

Dla budynku z Rys. 4 reprezentacja grafowa może wyglądać, tak jak przedstawiono na Rys. 5. Dla tak przedstawionej reprezentacji budynku łatwo wyznaczyć kluczowe dla bezpiecznego przepływu ludzi pomieszczenia. Przykładowo na Rys. 5 łatwo można zauważyć, że w przedstawionym budynku oprócz klatki schodowej, krytycznymi dla przepływu pieszych mogą być pomieszczenia A7, B4 oraz B5 - w nich zbiegają się drogi ewakuacyjne z wielu pomieszczeń.

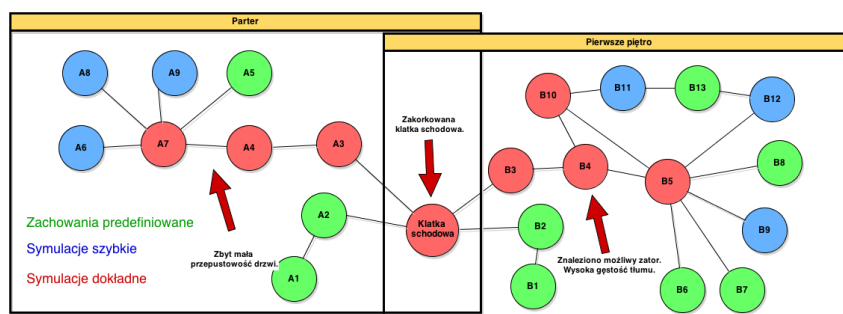
6 Analiza rozwiązań architektonicznych po kątem przepływu pieszych

Wykrywanie zagrożeń dla ruchu pieszych wykonywane jest dwupoziomowo. W pierwszej kolejności sprawdzana jest zgodność budynku z zadanymi normami. Przykładowo może być obliczane czy dane parametry korytarza (długość, szerokość, istniejące systemy wentylacyjne . . . itd) są według norm, wystarczające do przeprowadzenia ewakuacji sumy maksymalnej liczby osób, jakie znajdują się w przylegających do tego korytarza pomieszczeniach.

Należy jednak zwrócić uwagę, że pomimo iż normy są wciąż aktualizowane i unowocześniane, to wciąż możliwe jest zaprojektowanie budynku całkowicie z nimi zgodnego, w którym komfort, a przede wszystkim bezpieczeństwo ludzi nie będą na optymalnym poziomie. Oprócz automatycznego sprawdzenia zgodności budynku z istniejącymi normami, wykonywana jest kompleksowa symulacja zachowań pieszych w budynku i ich ewakuacji w sytuacjach zagrożenia.

Dzięki zastosowaniu grafowej reprezentacji pomieszczeń możliwe jest przeprowadzenie osobnej symulacji zachowania pieszych dla każdego pomieszczenia - węzła grafu. W zależności od wpływu danego pomieszczenia na przepływ pieszych oraz liczby znajdujących się w nim osób różne metody symulacji pieszych są wybierane.

Dla mało znaczących pomieszczeń z niewielką liczbą osób, zupełnie wystarczające może się okazać wykorzystanie predefiniowanych czasów opuszczenia pomieszczeń. W przypadku, mało znaczących pomieszczeń o umiarkowanej ilości ludzi przydatne są symulacje szybkie - przy niskich i średnich gęstościach tłumu różnica w symulacji zachowań ludzi pomiędzy symulacjami szybkimi i dokładnymi jest pomijalnie mała. Natomiast zachowanie dużych grup ludzi w kluczowych pomieszczeniach musi być modelowane przy użyciu metod dokładnych.



Rysunek 6. Przykładowy wynik działania systemu dla zadanego projektu architektonicznego przedstawionego na rys 4. Znaleziono jedną niezgodność z normami (zbyt wąskie drzwi) oraz dwa możliwe zagrożenia spowodowane wysoką gęstością tłumu podczas ewakuacji.

W wyniku przeprowadzania symulacji wyznaczane są miejsca, w których może dochodzić do zagrożeń w ruchu tłumu, takich jak:

- obniżona przepustowość drzwi, korytarzy związana z blokowaniem drogi lub łączeniem się strug pieszych,
- miejsca gdzie gęstość tłumu i ciśnienie w nim panujące może w przypadku ewakuacji osiągać wysokie wartości.

Po sprawdzeniu zgodności planu z normami budowlanymi oraz przeprowadzeniu symulacji zachowań tłumu, wyniki z obu tych analiz zostają przedstawione w postaci detekcji krytycznych miejsc.

7 Podsumowanie

Autorzy stwierdzają, że we współpracy z architektami istnieje możliwość stworzenia narzędzia do wspomagania projektowania obiektów pod kątem optymalnego przepływu ludzi. Wieloletnie doświadczenie autorów w modelowaniu dynamiki tłumu w połączeniu z doświadczeniem architektów i projektantów obiektów, pozwoli na wypracowanie stosowanych metodologii, a także stworzenie odpowiednich narzędzi wspomagających projektowanie i umożliwiających testowanie konkretnych wariantów rozwiązań architektonicznych.

Bibliografia

- [1] Burstedde C.K., Klauck K., Schadschneider A., Zittartz J.: Simulation of Pedestrian Dynamics using a 2-dimensional Cellular Automaton, *Phys. Rev. A* **295** (2001) 507–525.
- [2] Dijkstra J., Jessurun A.J., Timmermans H.: A Multi-Agent Cellular Automata System for Visualising Simulated Pedestrian Activity, *Proceedings of ACRI*, (2000) 29–36.
- [3] Dudek–Dyduch E., Was J.: Knowledge Representation of Pedestrian Dynamics in Crowd. Formalism of Cellular Automata. *Proceedings of ICAISC, Lecture Notes in Artificial Intelligence* **4029** (2006) 1101–1110.
- [4] Hall E.T.: *The Hidden Dimension*. Garden City, New York (1966)
- [5] Helbing D., Molnar P.: A Social Force Model for Pedestrian Dynamic, *Phys. Rev. E* **51**, 4284–4286 (1995)
- [6] Lubaś R., Miller J., Mycek M., Porzycki J., Was J.: Three different approaches in pedestrian dynamics modeling, New results n dependability and computer systems, *Advances in Intelligent Systems and Computing* Vol. 224, 285-294, (2013)
- [7] Narimatsu K., Shiraishi T., Morishita S.: Acquisiting of Local Neighbour Rules in the Simulation of Pedestrian Flow by Cellular Automata, *Proceedings of 6th ACRI, LNCS* **3305**, Amsterdam (2004) 211–219
- [8] Pauls J.: *Movement of people*, DiNenno (1995)
- [9] Was J., Gudowski B., Matuszyk P.J.: Social Distances Model of Pedestrian Dynamics, *International Conference on Cellular Automata For Research & Industry*, Perpignan, France, *Lecture Notes in Computer Science* Vol. 4173 (2006)
- [10] Was J.: Cellular Automata Model of Pedestrian Dynamics for Normal and Evacuation Conditions, *Proceedings of Intelligent Systems Design and Applications*, Wroclaw, IEEE CS Washington Brussels Tokyo (2005) 154-159
- [11] Was J., Lubaś R., Izak P.: Projektowanie ewakuacji z obiektów użyteczności publicznej z wykorzystaniem symulacji komputerowych, *Ochrona przeciwpożarowa w budownictwie : seminarium naukowo-techniczne : Zakopane, 4–6 października 2012 r.*, Izba Rzeczoznawców Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Pożarnictwa, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Pożarnictwa. Oddział Małopolska, Komenda Wojewódzka Państwowej Straży Pożarnej w Krakowie. — Kraków : Wydawnictwo SITP. Oddział Małopolska, cop. 2012