



Tomasz Prauzner

*Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie
Al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa
e-mail: matompra@poczta.onet.pl*

NOWOCZESNE TECHNIKI SYMULACYJNE ZAGROZEŃ W INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA

Streszczenie. W obszarze nauk technicznych proces modelowania oraz symulacji jest najczęściej pierwszym krokiem w pracy inżyniera. Symulacja pozwala na wygenerowanie wstępnych wyników badanego zjawiska, a dopiero na jej podstawie wdraża się badania bardziej profesjonalne, często oparte na kosztownych obiektach rzeczywistych. W pracy przedstawiony zostanie program symulacyjny Pathfinder wykorzystywany w inżynierii bezpieczeństwa do modelowania przebiegu ewakuacji i oceny zachowań osób przebywających w analizowanym obszarze badań. Symulację oparto na podstawie uproszczonego modelu komputerowego sanktuarium Matki Bożej Częstochowskiej Królowej Polski mieszczącego się w kompleksie budynków zakonu paulinów na Jasnej Górze w Częstochowie. Miejsce to zostało wybrane nieprzypadkowo, albowiem ze względu na popularność jest ono często i tłumnie odwiedzane podczas uroczystości kościelnych. Badania przeprowadzono na podstawie dwóch modeli algorytmu obliczeń programu: SFPE oraz modelu zmienno-sterującego. Otrzymane wyniki porównano oraz dokonano oceny przydatności programu w symulacji przebiegu działań ratowniczych. Program ten może być również przykładem nowoczesnej pomocy dydaktycznej w zakresie kształcenia BHP.

Słowa kluczowe: Pathfinder, symulacja komputerowa, inżynieria bezpieczeństwa, modelowanie, dydaktyka.

MODERN TECHNIQUES OF SIMULATION RISKS IN SAFETY ENGINEERING

Abstract. In the area of technical sciences, process modeling and simulation is most often the first step in working engineer. Simulation allows to generate the preliminary results of the studied phenomenon and only on the basis of them using the more professional studies, often based on expensive real objects. In the paper will be

presented simulation program Pathfinder used in safety engineering modeling and evaluation of the course of the evacuation behavior of people in the analyzed area of research. The simulation was based on a simplified computer model of the Shrine of Our Lady of Czestochowa, Queen of Polish located in the complex of buildings of Jasna Góra in Czestochowa. The site was chosen because coincidentally due to the popularity it is often crowded visited during church ceremonies . The study was conducted on the basis of two models of computation algorithm of the program: SFPE and model of floating-point control. The results were compared and evaluated the usefulness of the simulation run rescue operations. This program can also be an example of modern teaching aid in the field of health and safety training.

Keywords: Pathfinder, computer simulation, safety engineering, modeling, teaching.

Rola i znaczenie programów symulacyjnych w inżynierii bezpieczeństwa

Większość badań czy odkryć dokonuje się za pomocą symulacji komputerowej. Jak definiuje encyklopedia PWN¹, symulacja komputerowa to: *Metoda odtwarzania zjawisk zachodzących w świecie rzeczywistym (lub ich niektórych właściwości i parametrów) za pomocą ich zmatematyzowanych modeli, definiowanych i obsługiwanych przy użyciu programów komputerowych*. Składowymi symulacji komputerowej są zatem: system, w którym zachodzą relacje między obiektami, oraz rozpatrywany przez użytkownika model zarówno fizyczny, jak i matematyczny, będące podstawami symulacji komputerowej [9, 10]. Podstawową cechą symulacji komputerowej jest możliwie wiarygodne odtworzenie warunków panujących w świecie rzeczywistym i dokładne ich odwzorowanie, a także oddziaływanie na badany obiekt. Symulację komputerową używa się przeważnie, gdy rozwiązanie analityczne problemu jest zbyt trudne, bądź bywa niemal niemożliwe [7]. Rozpoczęcie pracy z symulacją wymaga spełnienia kilku kluczowych czynników. Pierwszym z nich jest stworzenie modelu przedmiotu badanego, który zostanie poddany warunkom występującym w rzeczywistości [14, 15]. Nie bez znaczenia jest również fakt, iż programy symulacyjne są nieocenioną metodą dydaktyczną na każdym poziomie kształcenia, i to zarówno w formie offline, jak i online [11, 13, 17,20].

Próba symulacji zachowania się osób za pomocą aplikacji komputerowych była celem wielu opracowań. Przykładem mogą być chociażby badania naukowe dotyczące opracowania następujących modeli: model Paulsa, uproszczony model Kikuji-Togawy, model Galbreatha, model Melineka i Bootha, model wg Hamanowicza, model ukazany w British Standard BS 7974

¹ Źródło: <http://encyklopedia.pwn.pl/>, 2014.

PD 7974-6 a także model Helbinga [1-5]. Niemniej jednak wszystkie modele posiadały pewne wady polegające przede wszystkim na analizie wybiórczych czynników, takich jak: warunki techniczne analizowanego obiektu, fizyczne osób oraz zachowania tłumu w sytuacji zagrożenia. W rzeczywistości wszystkie te parametry mają istotny wpływ na przebieg ewakuacji. Co więcej, w warunkach naturalnych mogą wystąpić takie czynniki, które są trudne do przewidzenia, a co dopiero do zamodelowania [13, 18]. Zachowanie tłumu w sytuacji ogólnej hysterii oraz interakcji poszczególnych osób są trudno przewidywalne, stąd wszelkie symulacje mogą być jedynie przedstawione w formie uproszczonej. W pracy przedstawiona zostanie aplikacja, która właśnie z powyższych, przytoczonych powodów jest w stanie w sposób najbardziej realistyczny zasymulować poszczególne etapy ewakuacji osób z miejsca zagrożenia [6, 8, 9].

W pracy tej przedstawiony zostanie jeden z najnowocześniejszych programów symulacyjnych o nazwie Pathfinder firmy Thunderhead [19]. Oprogramowanie posiada dokumenty weryfikacji i walidacji, potwierdzone próbami na rzeczywistych obiektach². Aplikacja ta wykorzystana została do opracowania przykładowego modelu komputerowego sanktuarium Matki Bożej Częstochowskiej Królowej Polski mieszczącego się w kompleksie budynków zakonu paulinów na Jasnej Górze w Częstochowie oraz zasymulowania ewakuacji osób w nim przebywających. Analizie poddany został również sam program, jego funkcje, zasada działania oraz przydatność w inżynierii bezpieczeństwa. Otrzymane wyniki porównano oraz wyciągnięto konstruktywne wnioski.

Projekt modelu sytuacyjnego

Jak już wspomniano, za obiekt modelowania i symulacji wybrano miejsce kultu religijnego (rys. 1-4). Obiekt został wybrany nieprzypadkowo, albowiem jako jedno z najczęściej odwiedzanych miejsc przez pielgrzymów powinien być bardzo dokładnie monitorowany pod każdym aspektem bezpieczeństwa. Warto wspomnieć, iż w kalendarium świąt religijnych są dni, kiedy liczba osób przebywających na terenie zakonu (kompleksu zabudowań) dochodzi do kilku tysięcy.

² Dokumenty walidacji i weryfikacji programu Pathfinder:
www.thunderheadeng.com/pathfinder/pathfinder-documentation/



Rys. 1. Pielgrzymi zebrani pod Jasną Górą



Rys. 2. Sanktuarium



Rys. 3. Bazylika Jasnogórska



Rys. 4. Pielgrzymi w anktuarium

Analiza działania programu Pathfinder

W 1987 r. w swoim opracowaniu pt. *Stado, tłum i decyzje jednostek: Podzielony model zachowania*, Craig Reynolds przedstawił koncepcję zachowań sterowanych. Poprzez kombinację trzech zachowań: (unikanie kolizji, dopasowanie prędkości i środkowanie tłumu) Reynolds pokazał, że możliwe jest skuteczne symulowanie poruszającego się stada ptaków w czasie rzeczywistym.

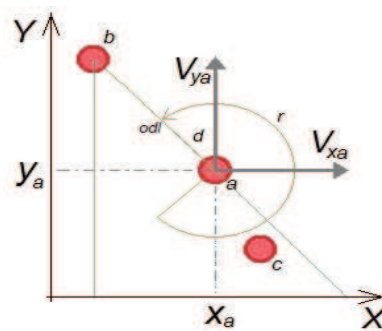
Głównym jego założeniem było stworzenie modelu, w którym będą poruszały się grupy ludzkie. Środowisko poruszania jest skonstruowane z sieci trójkątów budujących model. Ściany i inne nieprzekraczalne strefy reprezentowane są jako wycięcia w sieci nawigacyjnej. Obiekty te nie są pominięte w symulacji, ale stają się niedostępne do poruszania przez osoby ewakuowane. Drzwi są reprezentowane przez specjalne granice sieci nawigacyjnej. W zależności od ustawień

symulacji, drzwi mogą również wyraźnie regulować ilość przepływu ludzi³. Określenie parametrów ruchu wszystkich osobników zawiera parametry ruchu dla każdego osobnika oraz pewne reguły zachowania jednego osobnika w stosunku do pozostałych. Tak więc aplikacja uwzględnia takie same reguły zachowania dla każdego z elementów zbiorowości, natomiast w tym przypadku interesujący wydaje się problem współdziałania tych jednostek w grupie. Takie zagadnienie modelujące zachowanie się grupy osobników określa się poprzez pojęcie *boidy*. Podstawowym założeniem w modelowaniu zachowania się stada jest fakt, iż określenie wzorców zachowań i postępowania każdego z boidów jest możliwe jedynie w przestrzeni zamkniętej, ograniczonej za pomocą figury zamkniętej. Prędkość i kierunek ruchu są określane za pomocą kuli o środku x_a, y_a i promieniu r . Aby określić prędkość i kierunek ruchu, należy uwzględnić położenie osobnika, gdyż przez prędkość boida rozumie się zmianę położenia boida w jednostce czasu, natomiast kierunek ruchu wyznaczony jest przez nowe położenie boida. Zatem określenie prędkości i kierunku ruchu polega na wyznaczeniu współrzędnych boida po upływie jednostki czasu. Podążanie do celu – zadaną funkcją ruchu jest dążenie boida do wyznaczonego punktu (jest nim prosta łącząca boida z celem, do którego dąży). W miarę zbliżania się do celu prędkość boida maleje. Cel nie musi być statyczny, może nim być np. inny boid, który jest w ruchu.

Uproszczony model matematyczny

W układzie 2D boid a zdefiniowany jest przez cztery wartości (rys. 5):

- współrzędne położenia: X_a, Y_a ;
- wektora prędkości w układzie 2D dla współrzędnych położenia: V_{x_a}, V_{y_a} ;
- odległości d od innego boida (pole widzenia boida);
- kąt widzenia boida r .



Rys. 5. Interpretacja graficzna boida

³ Raport z wykonania symulacji ewakuacji, Przedsiębiorstwo Usług Pożarniczych TECHNO-POŻ®, Opole 2012.

Sprawdzamy, czy boid a jest sąsiadem boida b (sprawdzamy warunek minimalnej odległości pomiędzy boidami):

$$\sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} < d \quad (1)$$

jeżeli warunek nie został spełniony, to element na pewno nie jest sąsiadem boida. Jeżeli został spełniony, to sprawdzamy, czy jest on w kącie widzenia boida (obliczamy kąt α , pod którym porusza się boid):

$$\alpha = \arctan\left(\frac{V_{yb}}{V_{xb}}\right) \quad (2)$$

oraz kąt β odcinka od boidu do elementu:

$$\beta = \arctan\left(\frac{y_a - y_b}{x_a - x_b}\right) \quad (3)$$

następnie badamy wartość bezwzględną różnicy kątów i sprawdzamy, czy jest mniejsza od r , jeżeli tak – to boid b jest sąsiadem boida a , jeżeli nie – to nie jest.

Craig Reynolds przypisał każdemu boidowi następujące reguły postępowania:

- każdy boid dopasowuje swoją prędkość i kierunek lotu do sąsiednich boidów; należy obliczyć prędkość średnią wszystkich sąsiadów (boidów) (oddzielnie dla składowych V_{ix} i V_{iy}), prędkość boida a , biorąc pod uwagę wagę, z jaką będziemy modyfikować prędkość (np. 0.1), bieżącą prędkość, oraz obliczoną średnią, według ogólnego wzoru:

$$V_{xb} = V_{xb} + (\text{waga}(V_{x\text{średnia}} - V_{xb})) \quad (4)$$

$$V_{yb} = V_{yb} + (\text{waga}(V_{y\text{średnia}} - V_{yb})) \quad (5)$$

- każdy boid stara się być w środku grupy sąsiednich boidów; należy: obliczyć średnią odległość odl pomiędzy boidami, zmodyfikować prędkość boida a względem każdego z sąsiadów. Następujący wzór jest wynikiem zastosowania twierdzenia o podobieństwie trójkątów (rys. 5), wykorzystujemy w nim położenie boida b , którego prędkość modyfikujemy, położenie sąsiada $s(x,y)$, oraz wagę zmiany (np. 0.1):

$$odl = \sqrt{(s_x - x_b)^2 + (s_y - y_b)^2} \quad (6)$$

$$V_{xb} = V_{xb} - \text{waga} \left(\frac{(s_x - b_x)odl_{\min}}{odl} - (s_x - b_x) \right) \quad (7)$$

$$V_{yb} = V_{yb} - waga \left(\frac{(s_y - b_y) odl_{min}}{odl} - (s_y - b_y) \right) \quad (8)$$

odl_{min} jest zadaną odległością minimalną, której nie powinien przekraczać boid

- każdy boid zachowuje bezpieczną odległość od sąsiednich boidów;
- każdy boid unika przeszkód;
- każdy boid może opuścić stado, gdy ucieka przed drapieżnikiem lub potrzebuje pożywienia.

Powyższe reguły można wprowadzić do symulacji boidów, uwzględniając regułę o bezpiecznej odległości. Dodatkowo, w celu oddania większego realizmu, można dodać losowe zakłócenia ruchu boidów (np. w każdej iteracji dodając do składowych V_x oraz V_y niewielkie zaburzenie)⁴.

Warianty symulacji w programie

Na początku symulacji każda jednostka osobowa generuje ścieżkę, którą będzie poruszać się w kierunku wyjścia. Do tego celu Pathfinder wykorzystuje algorytm poszukiwania A*⁵ (A-star) oraz sieć nawigacyjną zbudowaną z trójkątów. Ścieżka wynikowa jest reprezentowana jako seria punktów na krawędziach trójkątów tworzących sieć. Linie łączące punkty tworzą niewygladzoną w węzłach ścieżkę poruszania się osób do celu. W celu wygładzenia ścieżki, program wykorzystuje wariacje techniki znanej jako *string pulling*. Prowadzi ona do ponownego dopasowania punktów, gdzie wynikowa ścieżka zakręca wyłącznie na rogach przeszkód przy zachowaniu minimalnego promienia koła (reprezentującego osobę) od przeszkody. Pathfinder wykorzystuje dwie podstawowe opcje poruszania się osób: tryb SFPE i tryb zmienno-sterujący. W trybie zmienno-sterowniczym drzwi nie wpływają na limit przepustowości ludzi, ale ludzie wykorzystują system sterowniczy do utrzymywania rozsądnego dystansu względem siebie. W trybie SFPE⁶ osoby nie mogą omijać się wzajemnie, prowadząc do przenikania się, ale drzwi wpływają na przepływ ludzi, natomiast prędkość kontrolowana jest przez zagęszczenie. Obliczenia SFPE opierają się na modelu przepływu, zdefiniowanym poprzez prędkość poruszania się i przejściu przez drzwi, schody i korytarze. Geometria nawigacyjna w programie jest grupowana jako elementy typu drzwi, pokoje oraz schody. Pokoje są otwartymi przestrzeniami, po których mogą poruszać się osoby. Drzwi stanowią czynnik ograniczający połączenia pomiędzy pokojami i schodami. Możliwe jest zacho-

⁴Portal Algorytm.org. Boidy, www.algorytm.org (21.4.2014).

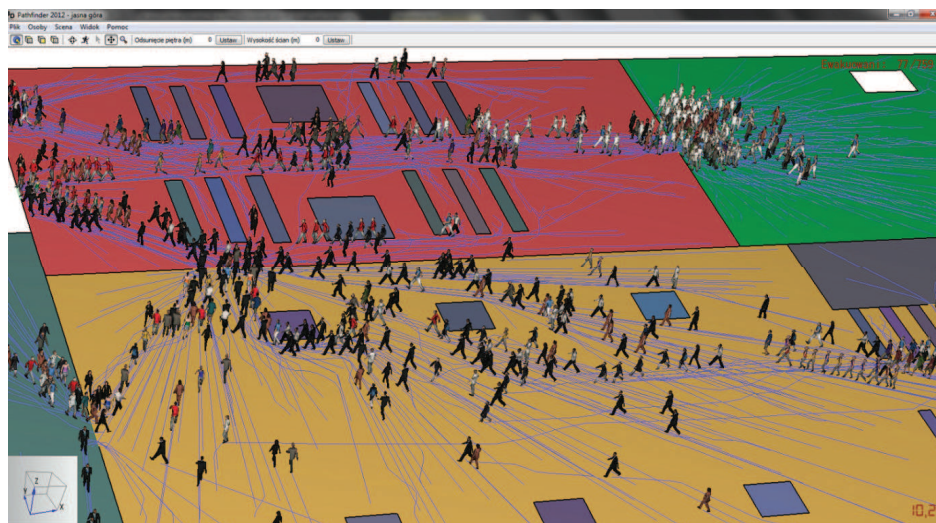
⁵Analiza działania algorytmu odnajdowania ścieżki typu A dokładniej została omówiona w literaturze online: http://www.policymalmanac.org/games/aStarTutorial_pl.htm

⁶SFPE- skrót od: Engineering Guide on Human Behavior in Fire.

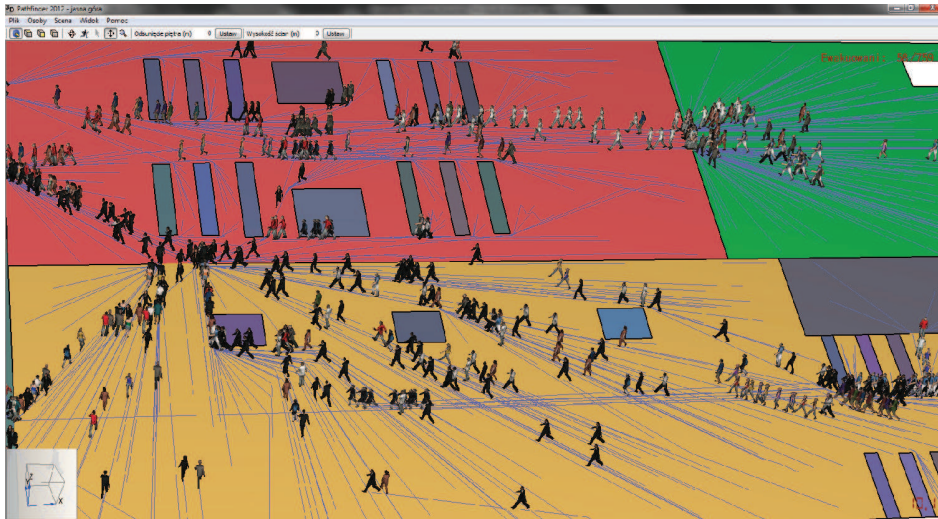
wanie przepływu określonego przez drzwi i równoczesne dodanie kolizji osób oczekujących przy drzwiach. Program wykorzystuje zagęszczenie w celu określenia prędkości poruszania się. Jeśli zagęszczenie wzrośnie do $3,8 \text{ osób/m}^2$, prędkość spadnie do zera i wejścia do pokoju zostaną wstrzymane. Jeśli jedne bądź więcej drzwi pozwolą na wejście do pokoju szybciej niż mogą oni wyjść, ograniczenie maksymalnego zagęszczenia zablokuje chwilowo przepływ. Efektywna szerokość drzwi ma wpływ na wielkość przejść osób przez drzwi.

Modelowanie i symulacja komputerowa

Model został zaprojektowany na podstawie przeprowadzonych rzeczywistych pomiarów obiektu. W symulacji przyjęto standardowe parametry związane z odwzorowaniem rzeczywistych parametrów (warunki fizyczne) boidów (osób). Przyjęto: prędkość poruszania się ludzi: $1,2 \text{ m/s}$; szerokość w ramionach: 46 cm (dzieci $26\text{--}29 \text{ cm}$); opóźnienie reakcji: 60 s . Symulacja została wykonana z wykorzystaniem modelu zmienno-sterującego oraz SFPE (rys. 6, 7).



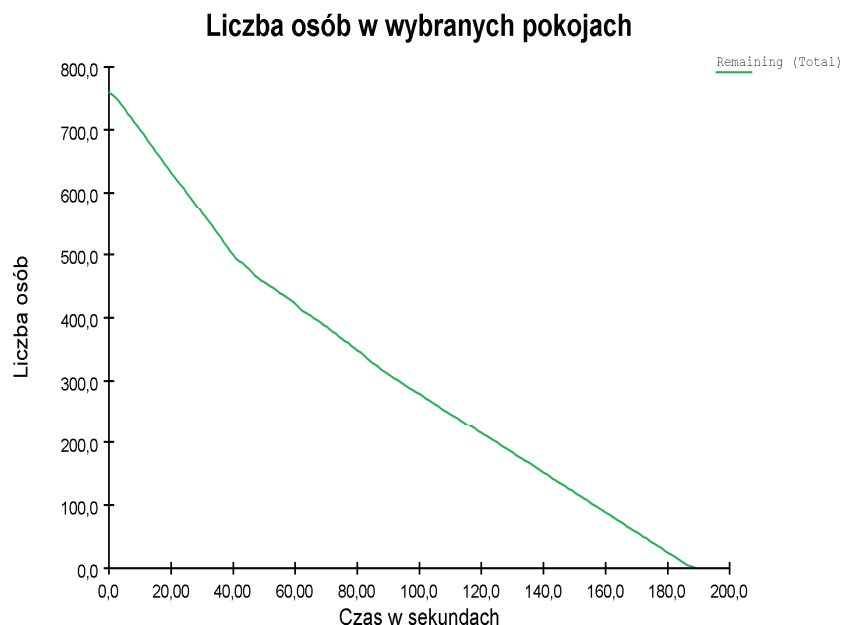
Rys. 6. Ewakuacja osób z katedry i sanktuarium - model zmienno-sterujący (opracowanie własne)



Rys. 7. Ewakuacja osób z katedry i sanktuarium – model SFPE (opracowanie własne)



Rys. 8. Model zmienno-sterujący – czas ewakuacji ludności ze wszystkich zamodelowanych pomieszczeń



Rys. 9. Model SFPE – czas ewakuacji ludności ze wszystkich zamodelowanych pomieszczeń

Wnioski

Symulacja jest przyszłością dalszego rozwoju techniki. Dzięki niej możemy symulować nie tylko modele zawarte w technicznej gałęzi przemysłu, ale również modele gospodarcze czy ekonomiczne. Jedynym ograniczeniem symulacji komputerowej jest poprawne zapisanie danych matematycznych o obiektach badanych oraz ich wzajemnym oddziaływaniu na siebie [16]. Symulacja została przeprowadzona przy użyciu programu Pathfinder 2011, autorstwa firmy Thunderhead. Oprogramowanie posiada dokumenty weryfikacji i walidacji, potwierdzone próbami na rzeczywistych obiektach. Symulacja została wykonana z wykorzystaniem modelu zmienno-sterującego oraz SFPE. Symulacje przeprowadzano w takich samych środowiskach i porównywano otrzymane czasy. Symulacja wykazała, iż przyjęty model zmienno-sterujący pozwala na przeprowadzenie symulowanej ewakuacji osób w tych samych warunkach zdecydowanie szybciej. Ewakuacja 759 osób z terenu całego obiektu analizowanego w tym modelu trwała jedynie około 173,3 sekund, natomiast zastosowany algorytm SFPE po upływie 184,9 sekund. W pracy tej przedstawiono model przybliżony rzeczywistości, stąd otrzymane wyniki należy uznać jedynie za orientacyjne. Należy pamiętać, że tryb SFPE jest bliższy obliczeniom ręcznym natomiast „zmiennie-sterujący” lepiej odzwierciedla zachowanie się tłumu. Warto podkre-

ślić, że tak skomplikowanego procesu jak ewakuacja nie da się jednoznacznie ująć w dość prostym wzorze matematycznym. Może on stanowić jedynie pewne bliżej nieokreślone przybliżenie. Stosując tryb „zmiennie-sterujący”, bierzemy pod uwagę kolizyjność na drogach ewakuacyjnych, więc nasza symulacja wyświetlana w Pathfinder jest bliższa rzeczywistości. Analizując dane uzyskane po przeprowadzeniu innych symulacji opisanych w literaturze przedmiotu, należy podkreślić fakt, iż program pozwala na poprawne oszacowanie sytuacji zagrożenia z dużym prawdopodobieństwem do obliczeń i oszacowań na podstawie innych metod analitycznych. Potwierdza to możliwości zastosowania aplikacji do sprawdzania czasów ucieczki z budynku i zakładanie z określonym przybliżeniem. Na czas ewakuacji osób ma również wpływ system nadzoru w postaci systemu alarmowego, który powinien monitorować ustawicznie wszelkie parametry fizyczne otoczenia. Jest to możliwe dzięki wykorzystaniu różnego rodzaju czujników instalowanych w celu monitorowania poziomu (zniekształceń itp.) sygnałów wejściowych do systemu alarmowego [18, 19]. System alarmowy może również współdziałać poprzez układy automatyki z elementami wykonawczymi, np. automatyką drzwi, układu wentylacji czy radiopowiadomienia służb bezpieczeństwa. Program jest specjalnym typem symulatora, gdzie każdy zdefiniowany pracownik posiada szereg indywidualnych cech, które mogą wpływać na jego ruchy i decyzje podczas samej symulacji niezależnie od innych jednostek. Program wykorzystywany jest przez autora jako pomoc dydaktyczna podczas zajęć laboratoryjnych w Instytucie Edukacji Technicznej i Bezpieczeństwa Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie [12, 14].

Literatura

- [1] Amor H. B., Murray J., Obst O., Fast, Neat, and Under Control: Arbitrating Between Steering Behaviors, *AI Game Programming Wisdom 3*, ed. S. Rabin. 2006.
- [2] Byszewski P., Tomaszewska A., Realistyczna oraz szybka wizualizacja algorytmu zachowania się tłumu w obliczu paniki, *Metody Informatyki Stosowanej*, Komisja Informatyki Polskiej Akademii Nauk, Oddział w Gdańsku, Gdańsk 2009.
- [3] Depešová J., Tomková V., Alternatívne formy vzdelávania v BOZP, *Trendy ve vzdelávání. Informační technologie a technické vzdelávání*, Roč. 6, č. 1, 2013, Nitre 2013.
- [4] Jamrozik A., Tutak W., Kociszewski A., Sosnowski M., et al., Numerical simulation of two-stage combustion in SI engine with prechamber, *Applied Mathematical Modelling*, 2013. 37(5): p. 2961-2982, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2012.07.040>

- [5] Johnson G., Smoothing a Navigation Mesh Path, *AI Game Programming Wisdom 3*, ed. S. Rabin, 2006.
- [6] Królikowski R., Łusiak M., Jędruch W., Modeling teamwork behaviors on a combat field in JADE, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, Gdańsk 2012.
- [7] Krzywański J., Czakiert T., Muskala W., Sekret R., Nowak W., Modeling of Solid Fuels Combustion in Oxygen-Enriched Atmosphere in Circulating Fluidized Bed Boiler – Part I. The mathematical model of fuel combustion in oxygen-enriched CFB environment, *Fuel Processing Technology*, 2010, Vol. 91, 290–295, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.10.011>
- [8] Kuligowski E.D., Peacock R.D., A Review of Building Evacuation Models, National Institute of Standards and Technology, Fire Research Division, Building and Fire Research Laboratory, Technical Note 1471, July, 2005. Available for download at <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/>.
- [9] Nelson H. E., Mowrer F. W., Emergency Movement, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, ed. DiNenno P., Walton D. W. National Fire Protection Association 2002.
- [10] Prauzner T., Applications of multimedia devices as teaching aids, *Annales UMCS Informatica*, Wydawnictwo Maria Curie-Skłodowska University in Lublin, Lublin 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.2478/v10065-010-0046-4>
- [11] Prauzner T., Bezpieczeństwo kulturowe a globalizm, *Edukacja XXI wieku, Jakość wobec wyzwań i zagrożeń XXI wieku*, Wyd. Wyższej Szkoły Bezpieczeństwa, Poznań 2010.
- [12] Prauzner T., Ptak P., Programy symulacyjne w inżynierii bezpieczeństwa, *Journal of Technology and Information Education, Strategie technického vzdělávání v reflexi doby*, Wydawnictwo Palacký University in Olomouc, Czechy 2011.
- [13] Prauzner T., Systemy monitoringu w inteligentnym budynku, *Prace Naukowe AJD. Edukacja Techniczna i Informatyczna*, Częstochowa 2012.
- [14] Prauzner, T., Zastosowanie programów symulacyjnych w nauczaniu przedmiotów technicznych, *Prace Naukowe AJD. Edukacja Techniczna i Informatyczna*, Wydawnictwo Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie, Częstochowa 2006.
- [15] Ptak P., Prauzner T., Rola i miejsce multimedialnych pomocy naukowych w edukacji technicznej, *Edukacja. Studia, Badania, Innowacje*, 2010 nr 02. Warszawa 2010.
- [16] Ptak P., Prauzner T., Zastosowanie programów komputerowych w dydaktyce przedmiotów technicznych, *Journal of Technology and Information Education*, nr 1/2011, Olomuniec 2011.

- [17] Reynolds C. A distributed behavioral model, Computer Graphics, Flocks, herds, and schools, New York, NY, USA 1987.
- [18] Reynolds C.W., Steering Behaviors For Autonomous Characters, Proceedings of the Game Developers Conference 1999, Miller Freeman Game Group, San Francisco, California 1999.
- [19] Strona internetowa firmy Thunderhead: www.thunderheadeng.com
- [20] Noga H., Metody socjometryczne w edukacji techniczno – informatycznej, Trendy ve vzdělávání 2009, Informační technologie a technické vzdělávání, Olomouc 2009.