

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Katedra Informatyki

Autoreferat rozprawy doktorskiej

**KOMPUTEROWE MODELOWANIE
ZACHOWAŃ ZBIOROWOŚCI LUDZKICH
W STANACH PANIKI**

Mirosław Zajdel

Promotor: Prof. zw. dr hab. inż. Bogusław Filipowicz

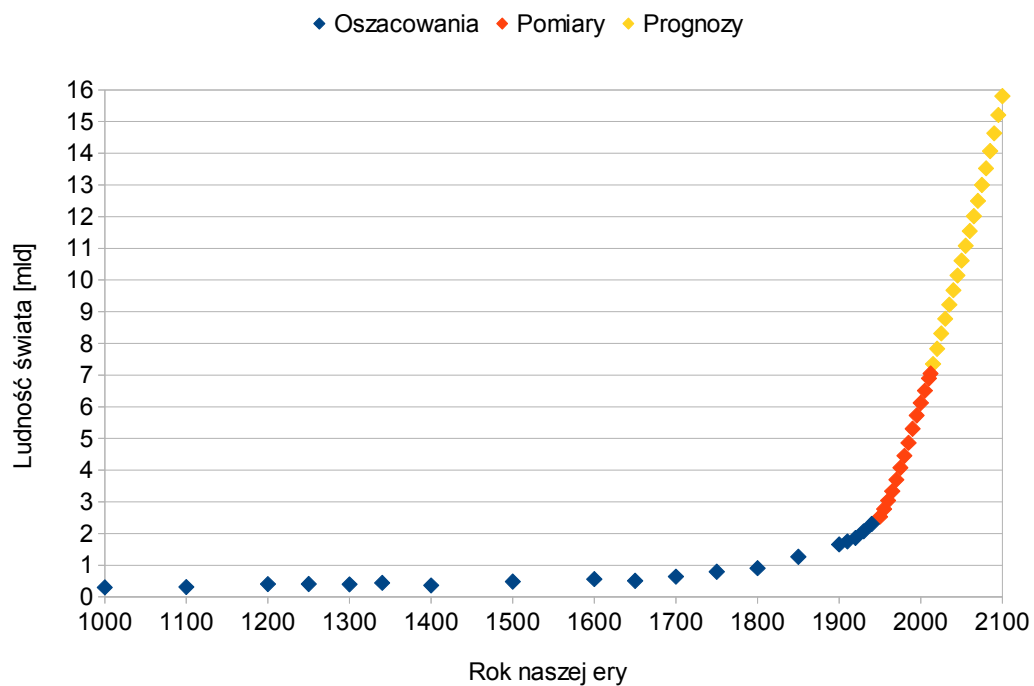
Kraków 2013

Spis treści

Wprowadzenie.....	2
Cel i teza dysertacji.....	4
Metodyka badań.....	4
Podsumowanie.....	7
Wkład w rozwój wiedzy.....	9
Komentarz krytyczny.....	10

Wprowadzenie

Od kilku dekad coraz większego znaczenia nabiera stwierdzenie, że tłumy odgrywają ważną rolę w funkcjonowaniu społeczeństw, a nawet ludzkości w ujęciu holistycznym. Kwestia ta jest bowiem rozpatrywana nie tylko na szczeblu lokalnym czy narodowym, lecz także, wobec rosnącej globalizacji, staje się tematem podejmowanym w dyskusjach międzynarodowych. Rola tłumów stale się powiększa, bowiem liczba ludności na świecie rośnie i to we wręcz niepokojącym tempie (Rysunek W.1). Aż chce się zacytować Le Bona¹, który już ponad sto lat temu pisał o gwałtownym wzroście potęgi tłumów. W konsekwencji, dzisiaj tłum jest już rzeczą powszechną, spotykanym na co dzień, zjawiskiem, z którym wcześniej czy później trzeba się oswoić. Niestety również coraz częściej można usłyszeć o wypadkach z udziałem tłumy.



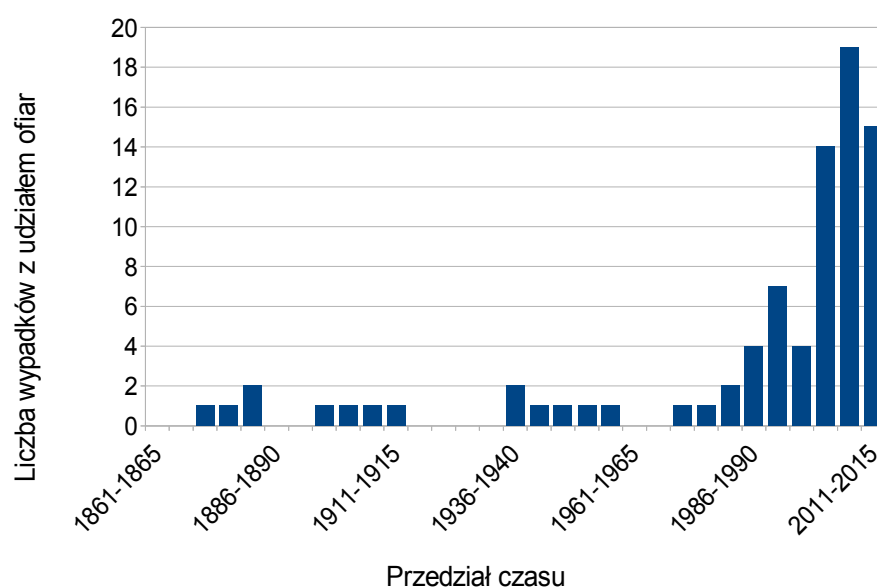
Rysunek W.1: Przyrost liczby ludności świata.
Źródło: Opracowanie własne.

Nie chodzi w tym przypadku o katastrofy, w których większa niż zazwyczaj liczba osób znalazła się w nieodpowiednim czasie i miejscu, ale o sytuacje, w których tłum daje się poznać jako personifikowana istota o psychice szaleńca, groźna dla otoczenia, a co jeszcze bardziej istotne – niebezpieczna też dla siebie samej. Tłum umyka psychologicznej klasyfikacji i często wymyka się spod kontroli, staje w obliczu zagrożenia, wpada w panikę.

W ostatnich latach zwraca się szczególną uwagę właśnie na tłumy ogarnięte paniką.

1 Gustave Le Bon (1841-1931), francuski lekarz, antropolog, socjolog, filozof i podróżnik. Uznawany za prekursora psychologii społecznej.

Zwłaszcza po doświadczeniach pochodzących z konfliktów zbrojnych, dotyczących zarówno zachowania ludności cywilnej jak i postępowania żołnierzy na polu walki, pojawiła się potrzeba opracowania technik zapobiegania i opanowywania paniki metodami psychologicznymi. Dalej, wzmożone fale napięć społecznych i zaburzeń, gwałtownych wystąpień i demonstracji, jakie przechodzą przez współczesny świat, powodują także konieczność wypracowania metod kontrolowania zachowań tłumów demonstrujących. Represja fizyczna, rozpędzanie tłumów siłą policji i wojska, daje tylko połowiczne efekty, gdyż nie rozwiązuje problemów, które leżą u podstaw zjawisk formowania się tłumów tego rodzaju. Wreszcie, nowoczesna rzeczywistość oferuje rzeszom ludzi grupową rozrywkę. Koncerty, wydarzenia kulturalne, rozgrywki sportowe czy handlowe dzielnice miast gromadzą codziennie niezliczonych amatorów, którym należy zapewnić bezpieczeństwo. W końcu, nie można też pominąć zjawiska masowych spotkań o charakterze religijnym, które są ściśle związane z ludzką kulturą i cywilizacją oraz generują tłumy w największej, spotykanej skali (na liście najliczniejszych w historii pokojowych tłumów pierwszych 10 miejsc zajmują zgromadzenia pielgrzymów i wiernych).



Rysunek W.2: Liczba wypadków śmiertelnych z udziałem tłumu pod wpływem paniki.
Źródło: Opracowanie własne.

Le Bon zwracał uwagę, że moc tłumów jest przede wszystkim niszcząca. Przestrzegał, że należy przygotować się na rządy tłumów i jak wieszcz pytał nieco retorycznie, czy istnieją środki, by świadomie ten proces kontrolować? Pytał nie bezpodstawnie, a jego obawy, czy ludzkość będzie w stanie sobie poradzić, były uzasadnione. Od około 20 lat liczba wypadków spowodowanych przez niekontrolowany tłum drastycznie rośnie. Rysunek W.2 ujmuje jedynie te spośród nich, w których tłum znajdował się pod wpływem paniki, a jej konsekwencją były ofiary śmiertelne.

Należy zwrócić uwagę, iż tragedie zdarzają się wyraźnie coraz częściej, pomimo zainteresowania badaczy tematyką już od dłuższego czasu. Można zatem domniemywać, że

odsetek wdrożonych rozwiązań jest niewielki, a te spośród pomysłów, które doczekały się praktycznej realizacji, cechują się niską skutecznością.

Jako że przedstawiana domena wiąże się bezpośrednio z ochroną zdrowia i życia ludzkiego, tym bardziej istnieje zatem potrzeba dalszej eksploracji zagadnienia zachowań ludzkiego tłumu w sytuacjach zagrożenia i paniki oraz ukazania tej kwestii w nowym świetle innowacyjnego podejścia. Poszerzanie granic nauki odbywa się bowiem poprzez odkrywanie zjawisk i praw, które już istnieją w przyrodzie bez względu na ludzką wiedzę. Wkład naukowca zaś polega na jego pionierskim, nowatorskim podejściu do problemu, które pozwala dostrzec rzeczy dotąd słabo widoczne.

Cel i teza dysertacji

Wobec faktu, iż dotychczasowe podejścia nie przyczyniły się do pełnej eksploatacji dziedziny badań nad zachowaniami tłumu, a opracowane modele wciąż pozostawiają istotne pytania otwarte, można sformułować następujący problem badawczy:

Istnieje potrzeba zbudowania komputerowego modelu zachowań tłumu, który uwzględniłby czynniki behawioralne, w tym w szczególności panikę. Przy czym model ten winien być oparty na biologicznie uzasadnionych mechanizmach.

Cel niniejszej dysertacji, jaki obrał sobie jej autor, by rozwiązać wyżej postawiony problem, można sformułować następująco:

Wyspecyfikowanie mechanizmów zachowań ludzkiego tłumu uzasadnionych badaniami, eksperymentami lub obserwacjami, szczególnie w warunkach zagrożenia i paniki.

Sformułowanie modelu komputerowego, opisującego zachowania tłumu z uwzględnieniem zdefiniowanych mechanizmów.

Teza dysertacji brzmi:

Wykorzystując mechanizmy behawioralne obserwowane u wybranych zwierząt stadnych, można zbudować model komputerowy zachowań zbiorowości ludzkich w stanach paniki.

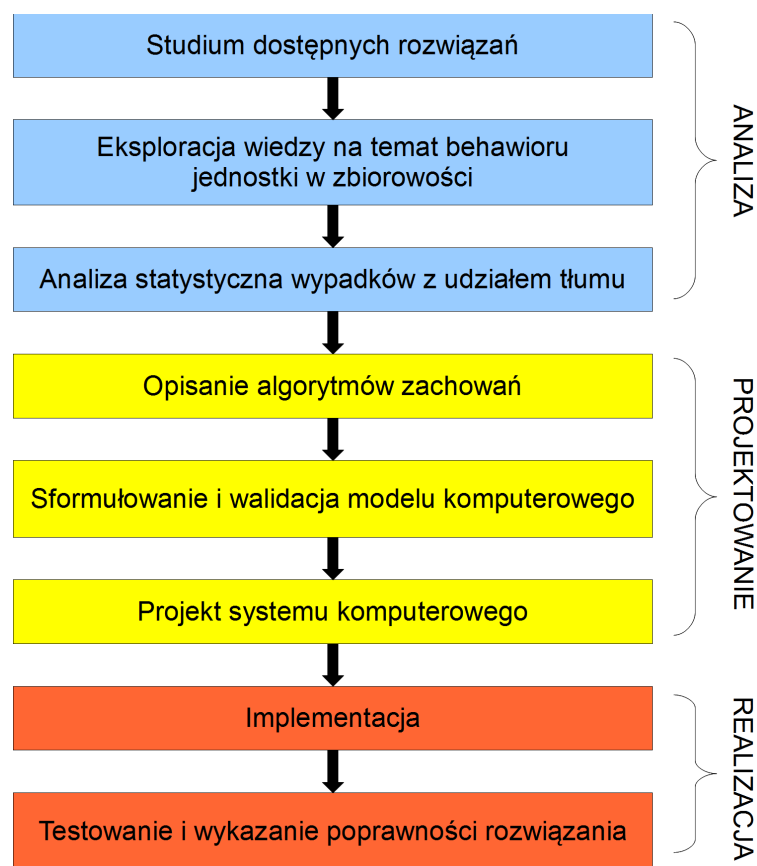
Metodyka badań

Ogólny zamysł niniejszej dysertacji opiera się na teorii ewolucji i doboru naturalnego Charlesa Darwina² oraz podejściu do problemu z punktu widzenia biologii ewolucyjnej. Za pośrednictwem mutacji, która jest w przyrodzie źródłem zmienności, dobór naturalny od milionów lat wyposaża istoty żywe w cechy i umiejętności, które predysponują je do funkcjonowania w określonych warunkach, w tym także w środowisku tłumu czy stada. Jako że ewolucja równie mocno związana jest z osobnikiem, co ze środowiskiem, w którym

2 Charles Darwin, 1809--1882, angielski przyrodnik, twórca teorii ewolucji i pojęcia doboru naturalnego.

ten osobnik funkcjonuje, należy przypuszczać, że u różnych gatunków przebywających permanentnie lub czasowo w zbiorowości, mogą pojawiać się podobne adaptacje stadne, promowane właśnie przez dobór naturalny.

Przyjęta metodyka badawcza bazuje więc na wysnutej paraleli pomiędzy zachowaniami stadnymi ludzi i zwierząt, które łączy wspólny mianownik – ewolucja. Podejście takie jest oryginalne, jako że dotychczas nie wskazano na powiązania behawioralne tłumów i stad, ani też nie przedstawiono wynikających z nich modeli zachowań. Interdyscyplinarna perspektywa widzenia tematu łączy w sobie wiedzę z zakresu socjologii, psychologii oraz etologii, które spaja praktyczne zastosowanie dorobku informatyki.



Rysunek W.3: Założone etapy realizowanych prac badawczych.

Źródło: Opracowanie własne.

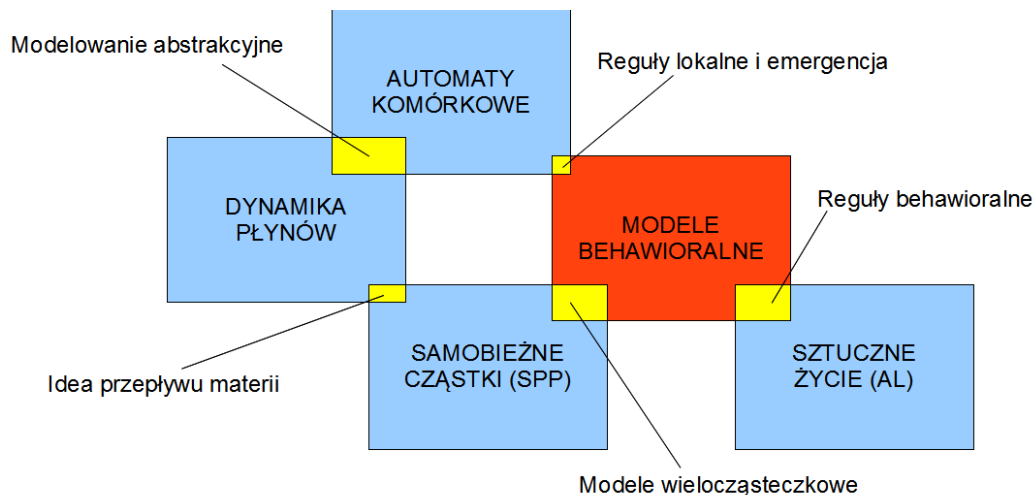
W celu wykazania przedstawionej powyżej tezy dysertacji, obrano do realizacji następujące etapy badań (Rysunek W.3):

- Analiza dotychczas opracowanych rozwiązań zagadnienia modelowania zachowań zbiorowości ludzkich w sytuacjach zagrożenia i paniki, w celu określenia ich zalet i słabości oraz wyspecyfikowania istotnych elementów tego rodzaju modeli.
- Analiza wyników badań, eksperymentów, obserwacji i literatury, dotyczących behawioru ludzkich tłumów oraz zwierzęcych stad, zarówno w ujęciu globalnym jak i z punktu widzenia jednostki, w celu wyznaczenia i opisania adaptacji

powstałych równolegle u różnych gatunków w wyniku działania doboru naturalnego, ze szczególnym uwzględnieniem sytuacji zagrożenia i paniki.

- Statystyczne zestawienie wypadków z udziałem panikującego tłumu i określenie elementów behawioralnych krytycznych dla bezpieczeństwa.
- Sformułowanie algorytmów dla kluczowych względem bezpieczeństwa mechanizmów zachowań zgodnie z zasadą *brzytwy Ockhama* (algorytmy muszą być uzasadnione ewolucyjnie).
- Sformułowanie oraz walidacja agentowego modelu zachowań jednostki w tłumie, łączącego w sobie interakcje fizyczne z procesami behawioralnymi.
- Zaprojektowanie systemu komputerowego realizującego opracowany model zachowań tłumu.
- Implementacja platformy pozwalającej na sprawne wykonywanie testów symulacyjnych oraz czytelną prezentację wyników.
- Wykazanie poprawności rozwiązania problemu poprzez skonfrontowanie wyników przeprowadzonych symulacji z rzeczywistymi eksperymentami oraz wydarzeniami.

Na tle dotychczasowych rozwiązań zagadnienia modelowania zachowań tłumu, proponowane podejście prezentuje się jak na Rysunku W.4.



Rysunek W.4: Miejsce omawianego podejścia na tle innych rozwiązań.

Źródło: Opracowanie własne.

Wśród jego zalet w stosunku do innych konceptów należy niewątpliwie wymienić uwzględnienie czynnika psychologicznego w zachowaniu jednostki, obok oddziaływań fizycznych. Ponadto, dzięki temu jednostka w odpowiednim stopniu zachowuje swoją autonomiczność, jednocześnie pozostając w ścisłym związku z tłumem. Wynikiem tego możliwe jest modelowanie sytuacji nietypowych, co stanowi istotny brak w innych rozwiązaniach. Wreszcie, zachowane zostaje również podejście *bottom-up* i zjawisko emergencji.

Ograniczenie, jakie musi zostać nałożone na rozwiązanie problemu (stworzony model komputerowy) wobec przyjętego podejścia, to kwestia dowiedzenia, iż jest on ewolucyjnie uzasadniony. Dobór naturalny obdarowuje bowiem organizmy prostymi

mechanizmami adaptacyjnymi, lub też w nieskomplikowany sposób udoskonalała te z nich, które już istnieją. Stąd opracowany model musi opierać się na regułach, którym żywy organizm jest w stanie podporządkować się w praktyce.

Podsumowanie

Zasadniczym celem niniejszej dysertacji było opracowanie i zaprezentowanie modelu komputerowego, opisującego zachowania tłumu w sytuacjach zagrożenia i paniki, wzorowane na reakcjach obserwowanych u zwierząt stadnych. Podwaliną dla realizacji tego celu stały się opisane w dysertacji adaptacje stadne, czyli mechanizmy przystosowawcze do funkcjonowania w stadzie, występujące równoległe u różnych gatunków zwierząt oraz u człowieka.

W ramach realizacji rozprawy doktorskiej przeprowadzone zostały badania, by wykazać tezę:

Wykorzystując mechanizmy behawioralne obserwowane u wybranych zwierząt stadnych, można zbudować model komputerowy zachowań zbiorowości ludzkich w stanach paniki.

W początkowej, analitycznej części dysertacji, zaprezentowane zostało szczegółowe studium na temat zasad tworzenia się i funkcjonowania tłumu, ze szczególnym uwzględnieniem sytuacji zagrożenia i stanów paniki. Następnie ukazana została eksploracja tematyki środowisk stad zwierząt, w celu określenia mechanizmów zachowań, jakie mogą występować zarówno w nich, jak również w ludzkim tłumie. Wyszczególnione analogie poparto wynikami eksperymentów, obserwacji i badań laboratoryjnych. Oddzielnie omówiono i udowodniono zasadność koncepcji doboru stadnego, decydującego o równoległych adaptacjach. W dalszej części rozprawy analiza statystyczna światowych wypadków z udziałem tłumu na przestrzeni lat pozwoliła na wyróżnienie wśród omówionych wcześniej zachowań tych, które są krytyczne, to jest występują najczęściej oraz stanowią najczęstsze przyczyny tragedii. Okazało się, że są to: efekt kaskady informacyjnej wywołujący nierównomierne obciążenie wyjść, wzmożone naśladownictwo prowadzące do podejmowania irracjonalnych decyzji grupowych, minimalizacja strefy zagrożenia będąca przyczyną ciasnego tłoczenia się tłumu oraz lawinowe rozprzestrzenianie się panicznego strachu, wywoływanego najczęściej przez błahy impuls i błyskawicznie propagowanego za pomocą pętli dodatniego sprzężenia zwrotnego na cały tłum.

Część praktyczna rozprawy polegała na sformułowaniu algorytmów dla wyróżnionych zachowań i sformułowaniu holistycznego modelu komputerowego, opisującego zachowanie jednostki w tłumie, łączącego podane algorytmy z odwzorowaniem oddziaływań fizycznych, jego walidacji. Kolejnymi pracami były: zaprojektowanie systemu komputerowego, implementacja, przeprowadzenie symulacji, opracowanie otrzymanych wyników i określenie poprawności proponowanego rozwiązania poprzez odniesienie ich do rzeczywistych wydarzeń i eksperymentów. Zasadnicze badania behawioralne w części eksperymentalnej składają się z czterech, głównych modułów.

W module pierwszym przedstawiono algorytm procesu kaskady informacyjnej, uwzględniający krytyczną liczbę jednostek, która decyduje o powstaniu tego zjawiska.

Jednocześnie uwzględniono w nim ocenę swojej sytuacji w tłumie przez jednostkę, wskutek uwzględnienia swojego położenia na tle innych oraz szacowania czasu potrzebnego do skorzystania z wyjścia ewakuacyjnego. Zaproponowany algorytm postępowania stanowi więc pomost między irracjonalnym zachowaniem w stanie paniki, a racjonalnym podejmowaniem decyzji w warunkach normalnych.

Moduł drugi prezentuje algorytm wzmożonego w stanach paniki naśladownictwa, stworzony w oparciu o strukturę zaproponowanego wcześniej modelu lokalnej percepcji jednostki w tłumie. Jednostka poprzez analizę najbliższych sąsiadów i swojego otoczenia podejmuje autonomiczną decyzję o działaniu. Jednocześnie cały proces decyzyjny na poziomie operacyjnym, przekładający się na określenie kierunku ruchu, zapewnia emergentny efekt utrzymywania się spójności tłumu. Opracowany algorytm łączy więc w sobie indywidualizm jednostki wraz z jej uzależnieniem w pewnym stopniu od tłumu, co nie było uwzględniane w dotychczas opracowanych modelach.

Algorytm opracowany w module trzecim jest konsekwencją doprecyzowania i praktycznego zrealizowania występującej w literaturze koncepcji samolubnego osobnika, opisującej zachowanie jednostki w obliczu zagrożenia czy stanie paniki. Opracowanie to jest wyjątkowo cenne, gdyż wykazuje, że brak jest uniwersalnej, jednoznacznie najlepszej strategii zachowania w każdych warunkach. Tym samym stwarza to możliwość prowadzenia dalszych badań nad przedstawionym schematem postępowania pod kątem znalezienia optymalnych z punktu widzenia jednostki (lub całego tłumu) strategii w konkretnych sytuacjach.

Czwarty moduł przedstawia proces rozprzestrzeniania się tytułowej paniki w tłumie, z wykorzystaniem pętli dodatniego sprzężenia zwrotnego. W modelu posłużono się esencją badań nad paniką z zakresu socjologii i etologii. To zupełnie nowatorskie spojrzenie na zachowanie tłumu od strony czysto psychologicznej, która to jak dotąd była bagatelizowana w innych podejściach do modelowania zbiorowych zachowań.

Model zachowania jednostki w zbiorowości, spajający powyższe moduły z fizyczną dynamiką tłumu, obejmuje ponadto odniesienie do obserwacji, badań i eksperymentów z udziałem realnego tłumu, które pozwalają skonfrontować przedstawiony model komputerowy z rzeczywistością i przeprowadzić jego walidację.

Podsumowując, należy stwierdzić, że po analizie dotychczasowych koncepcji rozwiązań, na podstawie badań, eksperymentów i obserwacji behawioru stad zwierząt oraz tłumów ludzi opracowano i zweryfikowano poprawność behawioralnego modelu komputerowego opisującego zachowania uczestników ludzkiego tłumu w stanach paniki, uwzględniając przy tym zarówno działania logiczne, jak i efekty irracjonalne. Zaprojektowano oraz zaimplementowano aplikację komputerową realizującą powyższy model, a w toku porównania wyników symulacji komputerowych z danymi rzeczywistymi pochodzącymi z wypadków z udziałem tłumu oraz eksperymentów, dowiedziono poprawności opracowanego systemu. Zatem:

W przekonaniu autora, przeprowadzone badania i uzyskane w ich toku rezultaty potwierdzają postawioną we wstępie dysertacji tezę, iż poprzez wykorzystanie mechanizmów behawioralnych zaobserwowanych u wybranych zwierząt stadnych, możliwe jest zbudowanie modelu komputerowego, opisującego zachowania zbiorowości ludzkich w warunkach paniki.

Wkład w rozwój wiedzy

Zaprezentowane w niniejszej dysertacji podejście do modelowania zachowań tłumu od strony behawioralno-ewolucyjnej przedstawia innowacyjny punkt widzenia problemu. Opracowany w ramach prowadzonych badań model komputerowy zajmuje nową pozycję na mapie rozwoju tytułowej dziedziny. Za najważniejsze, oryginalne osiągnięcia dysertacji, służące rozwojowi wiedzy w rozpatrywanym obszarze nauki, autor uważa, jak następuje.

Wśród analiz teoretycznych:

- Odkrycie istnienia elementu składowego doboru naturalnego, jakim jest zjawisko doboru stadnego, czyli równoległego występowania podobnych adaptacji u ludzi funkcjonujących w tłumie oraz u różnych gatunków zwierząt stadnych. Fakt ten stanowi *clou* rozważań zawartych w dysertacji i jest istotną kwestią dla sformułowanej tezy.
- Opracowanie zbiorczego zestawienia oraz szczegółowej analizy statystycznej wypadków z udziałem tłumu w stanie paniki na przestrzeni ostatnich 120 lat, z wykorzystaniem obszernego zbioru źródeł literatury. Kompilacja ta wskazuje badaczom tłumu obszary krytyczne w kontekście bezpieczeństwa i wymagające szczególnej uwagi.

Wśród opracowań praktycznych:

- Sformułowanie spójnego modelu komputerowego, odzwierciedlającego zachowanie jednostki ludzkiej w tłumie będącym pod wpływem zagrożenia lub paniki, uwzględniającego nie tylko interakcje fizyczne pomiędzy jednostkami, lecz także psychologiczne aspekty indywidualnego wnioskowania i instynktownego zachowania uczestników tłumu.
- Opracowanie oraz implementacja algorytmu behawioralnego uczestnika tłumu przenoszącego na grunt symulacji komputerowych efekt kaskady informacyjnej. Pozwoliło to na potwierdzenie negatywnego wpływu tego zjawiska w ogólnym przypadku, wyspecyfikowanie wskazówek co do działań jednostki w tłumie, które mogą ten niekorzystny efekt zminimalizować, a także na opracowanie wytycznych w kwestii efektywnego rozmieszczania wyjść ewakuacyjnych.
- Opracowanie oraz implementacja algorytmu behawioralnego odzwierciedlającego zjawisko pojawiania się wzmożonego naśladownictwa u uczestników tłumu. Dzięki temu wykazano zależność zachowania tłumu od zasięgu percepcji jego jednostek oraz szczegółowo zbadano efekt kolejki, występujący w początkowej fazie formowania się tłumu.
- Opracowanie oraz implementacja algorytmu behawioralnego, stosowanego przez uczestników tłumu do minimalizacji swoich stref zagrożenia. Na gruncie komputerowego modelu uwzględniającego istnienie stref zagrożenia wokół jednostek, porównano efekty różnych strategii postępowania zmierzających ku ich minimalizacji, jak również zbadano efekt fali stojącej oraz związane z nim zjawisko wyrzutów koronalnych.
- Opracowanie oraz implementacja algorytmu rozprzestrzeniania się paniki w tłumie. Posłużył on do odkrycia, iż odpowiedni odsetek jednostek postępujących

racjonalnie i nie poddających się dyfuzji psychologicznej, przyczynia się do zahamowania propagacji paniki. Podobnie właściwości izolacyjne w tym względzie zaobserwowano w wyniku wprowadzania pustych przestrzeni separujących części tłumu.

- Zaprojektowanie systemu komputerowego realizującego opracowany model zachowania tłumu i jego implementacja w postaci aplikacji symulacyjnej *Bio-Inspired Crowd Simulator*.

Opracowany model komputerowy może zostać zaimplementowany wzorem platformy testowej *Bio-Inspired Crowd Simulator* jako dedykowane narzędzie użytkowe i posłużyć do celów praktycznych. Jego realizacja w postaci aplikacji symulacyjnej jest w stanie pełnić funkcję dodatkowego czynnika wspomagającego ocenę bezpieczeństwa dużych obiektów użyteczności publicznej, jak stadiony czy centra handlowe, a także planów imprez plenerowych, zgromadzeń lub obrzędów religijnych związanych bezpośrednio z obecnością tłumu.

Z powodzeniem komputerowy model behawioralny może być wykorzystany również jako specjalny instrument, służący do oceny projektów architektonicznych oraz planowanych ścieżek ewakuacji, o czym autora dysertacji zapewniają sami zainteresowani architekci i służby pożarnicze. W tym przypadku jego realizacja aplikacyjna pełniłaby rolę elementu ponadprogramowego, jako że polskie normy dotyczące zagadnień ewakuacji w obiektach nie przewidują konieczności wykonywania symulacji, a jednocześnie czynnika rozwoju, gdyż w najlepiej rozwiniętych państwach europejskich takie wymogi są już obecnie stawiane.

Komentarz krytyczny

Oceniając obiektywnie zaproponowane podejście, bazujące na istocie ewolucji i doboru naturalnego, można stwierdzić z pewnością jego wyjątkową oryginalność. Jednocześnie w dysertacji zawartych zostało wiele dowodów i przykładów świadczących o tym, że jest ono w pełni uzasadnione. Z pewnością nie jest to uniwersalny sposób podnoszenia wszystkich problemów związanych z modelowaniem behawioru tłumu, gdyż nie można powiedzieć, że całe spektrum jego zachowań ma swoje odpowiedniki w świecie zwierząt. Jednakże nowe spojrzenie na tłum, z punktu widzenia psychologii zachowań, a nie oddziaływań fizycznych, na pewno rzuca nowe światło na problem, w którego proponowanych rozwiązaniach można od jakiegoś czasu dostrzec pewną stagnację. Idea podejścia behawioralno-ewolucyjnego powinna być brana pod uwagę przez badaczy tłumu, którzy w przyszłości będą opracowywali swoje autorskie koncepcje jako ta, która wskazuje na spojrzenie na działania zbiorowości w obliczu zagrożenia z nowej, znaczącej i ciekawej perspektywy.

Gdyby autor rozpoczynał realizację pracy w dniu dzisiejszym, posiadając wiedzę, jaką nabył w drodze realizacji niniejszej dysertacji, w jego podejściu uwzględniona zostałaby jeszcze bardziej pogłębiona wiedza z zakresu psychologii zachowań człowieka, oparta na eksperymentach laboratoryjnych z udziałem jak największej grupy osób. Jest tak z kilku zasadniczych powodów.

Jako że zwierzęta są organizmami prostszymi od człowieka i nie posługują się zaawansowanymi metodami wnioskowania, a ponadto całe życie wiele spośród nich spędza

w stadach, ich zachowania stadne w obliczu zagrożenia są bardziej czytelne i naturalne, a także łatwiejsze w obserwacji, interpretacji i opisie. U ludzi trudniej jest dostrzec i wyizolować elementarne mechanizmy behawioralne z tego względu, że ich zachowanie obciążone jest jarzmem skomplikowanych procesów myślowych. Skala tłumu, w jakiej można je obserwować, utrudnia badania laboratoryjne, a ponadto niedopuszczalne etycznie jest prowadzenie badań w sytuacjach paniki czy też sztuczne jej wywoływanie dla celów badawczych. Stąd istnieje sporo opracowań naukowych na temat zachowań zwierząt w obliczu zagrożenia i paniki, zaś informacje o analogicznych procesach występujących u ludzi są tylko szczytkowe i lakoniczne. Dlatego też jakkolwiek niemożliwe jest wywołanie prawdziwej paniki w warunkach laboratoryjnych, to jednak badania eksperymentalne z udziałem zbiorowości ludzkiej są cenne dla potrzeb weryfikacji spostrzeżeń. Poprzez wzbogacenie o nie dotychczasowych badań, zapewne możliwe stałoby się zaproponowanie większej liczby algorytmów behawioralnych, a także doprecyzowanie tych, które zostały opracowane w rozprawie doktorskiej.

Niniejsza dysertacja stanowi zwieńczenie istotnego etapu prac autora nad zastosowaniem podejścia behawioralno-ewolucyjnego do rozwiązywania współczesnych problemów bezpiecznego funkcjonowania tłumu. Jednocześnie otwiera ona szerokie perspektywy dla kontynuowania badań i analiz, wśród których jako obiecujące autor dostrzega:

- Poszukiwanie kolejnych, satysfakcjonujących adaptacyjnie strategii zachowania, minimalizujących strefę zagrożenia, w tym także studium szczególnych przypadków sytuacyjnych.
- Przeprowadzenie zrównoleglenia obliczeń dla potrzeb modelowania skomplikowanych obiektów oraz symulowania zachowań tłumu w większej skali aniżeli ta, na którą pozwala obecna postać aplikacji symulacyjnej.
- Stworzenie kompleksowej platformy symulacyjnej, opartej na idei działania doboru naturalnego poprzez mutację na cechy osobnicze, w celu wyznaczenia dostatecznie dobrych konfiguracji tych cech, które pozwalają na bardziej efektywne i bezpieczne funkcjonowanie tłumu.
- Stworzenie kompleksowej platformy ewolucyjnej, optymalizującej drogą doboru naturalnego i mutacji formy, kształty oraz układ przestrzenny elementów architektonicznych, pod kątem wykorzystania ich jako pasywnych elementów wspomagających i porządkujących proces ewakuacji.