

**Marek TABĘDZKI**

Politechnika Białostocka, Wydział Informatyki

ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

E-mail: m.tabedzki@pb.edu.pl

## **Podejścia mikroskopowe w modelowaniu zachowania tłumu – przegląd**

### **1 Wprowadzenie**

Tłum jest zjawiskiem, z jakim stykamy się praktycznie na co dzień. Wszędzie, gdzie mamy do czynienia z dużą zbiorowością ludzką, możemy obserwować zachowania charakterystyczne dla tłumu. Tłum, w pewnych sytuacjach, może formować się spontanicznie (np. wskutek dużego zagęszczenia lub ograniczeń ruchu) bądź też tworzyć zorganizowaną grupę, mającą określone cele (np. widzowie lub protestujący). W pracach poświęconych analizie zachowań tłumu wyróżnia się więcej rodzajów tłumu [1] – wskazując na przyczynę i charakterystykę zgromadzenia – począwszy od zbiorowisk typu przechodnie na ulicy lub kolejki w markecie, aż po aktywne grupy kierowane agresją bądź strachem. Niezależnie od charakterystyki zawsze będzie cechować je bliskość fizyczna oraz wspólny obiekt zainteresowania. Tłum powinien być traktowany jako dynamiczna całość – jego zachowaniem kierują bowiem zasady nie obserwowane u pojedynczych osobników. Wykształcają się pewne, wynikające z wzajemnej interakcji, zjawiska – tzw. odruchy stadne, gdy jednostki w tłumie przestają działać niezależnie, czego przykładem może być równoczesne klaskanie widowni lub atak paniki.

Zachowania te są przedmiotem zainteresowania i badań w wielu dziedzinach. W architekturze czy urbanistyce może mieć to na celu zaprojektowanie rozwiązań zapewniających funkcjonalność i wygodę dużych grup ludzkich. Z kolei organizatorzy imprez masowych mogą być zainteresowani oceną stopnia bezpieczeństwa. Stąd potrzeba analizy zachowania tłumu, a także modelowania i symulacji, które pozwalają na przewidywanie działania grupy. Symulacja ruchu i interakcji pozwala odtwarzać zjawiska obserwowane w zbiorowości i rozpatrywać rozmaite scenariusze: począwszy od swobodnego przepływu, aż po zachowanie w sytuacjach krytycznych (ewakuacja, zamieszki). Wyniki tych analiz mogą być wykorzystywane na przykład w treningu jednostek odpowiedzialnych za bezpieczeństwo i kontrolę nad tłumem. Tego typu modele mogą też znaleźć zastosowanie w przemyśle filmowym oraz grach wideo – symulacja ruchu dużej liczby jednostek pozwala na wizualizację imponujących scen batalistycznych z użyciem grafiki 3D. Poniższa publikacja poświęcona jest tym zagadnieniom.

### **2 Modelowanie zachowania tłumu**

Istnieje wiele różnych podejść do symulacji tłumu i modeli jego zachowania [2]. Można je podzielić na podejścia makro- oraz mikroskopowe. Modele makroskopowe, holistyczne skupiają się na wartościach uśrednionych (jak przepływ czy gęstość), opisując tłum jako całość. Zdają się one obecnie ustępować zdobywającym coraz

większą popularność modelom mikroskopowym [3]. Modele tego typu traktują jednostki w tłumie (oraz interakcje między nimi) w sposób indywidualny. Są one bardziej skomplikowane, jednak pozwalają na obserwowanie pewnych zjawisk, które nie są dostrzegalne w modelach makroskopowych. Niniejsza praca skupia się właśnie na modelach tego typu.

Najprostsze modele zachowania tłumy ograniczać się będą do poziomu fizycznego – biorąc pod uwagę jedynie fizyczne zależności. Przykładem są metody opierające się na systemach cząsteczkowych – pojedynczy osobnicy są traktowani jak poruszające się swobodnie cząsteczki gazu lub sypkiej substancji. Działają na nie siły wymuszające ruch, zaś mechanizm kolizji stanowi ograniczenie uniemożliwiające nachodzenie na siebie. Jest to podejście proste w implementacji, ale daje mało realistyczne wyniki. Metody bardziej zaawansowane, w celu odwzorowania złożonych zachowań, będą uwzględniać aspekt psychologiczny oraz socjologiczny. Aspekt psychologiczny oznacza wykorzystanie elementów sztucznej inteligencji. Poszczególne jednostki opierają swe działania na informacji zebranej przy pomocy zmysłów, mają też własne cele, zestaw indywidualnych cech, mogą zmieniać swój stan oraz reagować na zmiany w środowisku. Pozwala to na uzyskanie dużo większego realizmu. Aspekt socjologiczny oznacza wzięcie pod uwagę zależności i zachowań społecznych, złożonych interakcji, w tym zachodzących na przestrzeni dłuższego czasu i między wieloma osobnikami.

Najpopularniejsze podejścia mikroskopowe opierają się bądź to na automatach komórkowych, bądź na systemach agentowych. Opisano je w kolejnych rozdziałach.

### 3 Automaty komórkowe

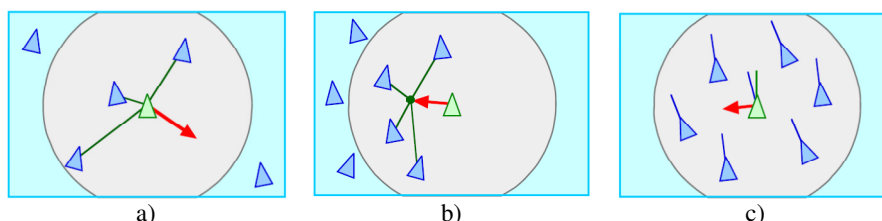
Automaty komórkowe, zaproponowane przez Stanisława Ulama oraz Johna von Neumanna w latach czterdziestych XX wieku [4], operują na dyskretnej przestrzeni (regularnej siatce komórek) oraz dyskretnym czasie (ewolucja następuje równocześnie dla wszystkich komórek). Automaty wykorzystywane w symulacji tłumy odbiegają jednak znacząco od popularnej „gry w życie” Conwaya. Uwzględniają one różne typy komórek, różne funkcje przejścia, a przy generowaniu nowego stanu biorą pod uwagę nie tylko relacje lokalne, ale i sięgające niekiedy na obszar całej siatki [5].

W modelach komórkowych przyjmuje się standardowo, że jedna komórka automatu może zawierać pojedynczego osobnika. Ewolucja automatu polega na podjęciu decyzji dotyczącej ruchu (przemieszczenia się do sąsiedniej komórki) każdego osobnika. Istotne jest to, że wskutek tego nie może zmienić się liczba zajętych komórek. Decyzja może być podejmowana w różny sposób. Jedną z częściej stosowanych metod jest wykorzystanie pola wektorowego wytyczającego pożądane ścieżki – takie podejście pozwala symulować omijanie przeszkód. Przedstawiono to na rysunku 1. Przeważnie model wzbogaca się o pewien aspekt losowości.

Jeśli prędkość ruchu jest stała i wynosi 1 (czyli osobnicy mogą przemieszczać się jedynie do sąsiednich komórek), zadanie jest proste. Sprawa komplikuje się w sytuacji, gdy te prędkości mogą być większe i tory ruchu osobników mogą się przecinać. Można spotkać się z różnymi sposobami rozstrzygania konfliktów – począwszy od zablokowania ruchu obu osobników, aż po umożliwienie wzajemnego przecinania ścieżek, o ile tylko komórka docelowa nie jest zajęta. Kilka takich metod przedstawiono



- na sterowaniu w kierunku uśrednionego centrum grupy lokalnej;
- wyrównanie (rys. 2c) – polega na orientacji w uśrednionym kierunku grupy lokalnej, pozwala na obranie wspólnego celu całej grupy, dzięki tej zasadzie grupa reaguje jako całość, zaś agenci naśladują ruch sąsiadów.



Rys. 2. Zasady sterowania: a) rozdzielanie; b) spójność; c) wyrównanie;  
źródło: <http://www.red3d.com/cwr/steer/gdc99/>

Fig. 2. Boids steering behaviors: a) separation; b) cohesion; c) alignment;  
source: <http://www.red3d.com/cwr/steer/gdc99/>

Autor opisał również szereg dodatkowych zasad, pozwalających na odtwarzanie bardziej złożonych zachowań. Należą do nich między innymi: unikanie kolizji, sterowanie w polu wektorowym (służącym jako mapa i wytyczającym preferowane ścieżki), poszukiwanie i ucieczka (polegające na sterowaniu w celu zbliżenia się lub oddalenia od określonego punktu przestrzeni), pogoń i unikanie (podobnie jak w poprzednim przypadku, jednak dotyczące celu ruchomego). Niewątpliwą zaletą tego modelu jest jego prostota.

#### Social Force Model

Jednym z najpopularniejszych modeli agentowych jest model *Social Force* Helbinga [8]. Zwraca on uwagę zarówno na interakcje społeczne, jak i fizyczne. Agenci po najkrótszych ścieżkach podążają w kierunku wybranych przez siebie celów, lecz na ich ruch mają wpływ rozmaite siły przyciągania i odpychania. Siły odpychania mają na celu zachowanie odległości od przeszkód (elementów otoczenia) oraz innych uczestników ruchu (zachowanie przestrzeni osobistej). Siła ta zależy od lokalnej gęstości i prędkości agenta. Siły przyciągania reprezentują efekt uwagi czy zainteresowania (np. wystawami sklepowymi bądź znajomymi – innymi agentami). Jest to siła słabnąca w czasie.

Wadą tego podejścia jest niska wydajność, utrudniająca symulację licznych grup na przestrzeni dłuższego czasu.

#### RVO i ORCA

Innym popularnym podejściem jest model RVO (ang. *Reciprocal Velocity Obstacle*) [9]. Opiera się on na obliczeniu przestrzeni dopuszczalnych prędkości (czyli takich, które zapewniają brak kolizji). Jest to rozwinięcie koncepcji *velocity obstacle* – zbioru prędkości skutkujących kolizją z innym agentem, przy założeniu, że zachowa on swą aktualną prędkość. Każdy z agentów niezależnie ustala swoją prędkość tak, aby gwarantowała uniknięcie kolizji w ustalonym czasie  $t$ , zakładając przy tym, że inni agenci stosują podobne wnioskowanie. Modyfikacja ORCA (ang. *Optimal Reciprocal*

*Collision Avoidance*) [10] wprowadza dodatkowo warunek, by obierana prędkość była jak najbliższa prędkości pożądanej.

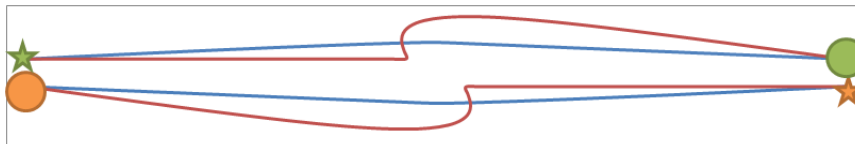
Autorzy udostępniili do pobrania bibliotekę w C++ i C# z implementacją swoich algorytmów. Znajduje się ona na stronie grupy badawczej GAMMA (*Geometric Algorithms for Modeling, Motion, and Animation*) – <http://gamma.cs.unc.edu/RVO2/>.

### Warianty i modyfikacje

Poniżej przedstawiono kilka prac analizujących różnego rodzaju przypadki specjalne, czy też dodatkowe aspekty zachowania tłumu.

W pracy [11] autorzy przedstawili wyniki symulacji tłumu zgromadzonego w czasie hadżdżu w Mekce wokół Al-Kaby. Charakterystyczną cechą tej pracy jest duży rozmiar tłumu – użyto 35 tysięcy działających jednocześnie agentów. Wartość ta odpowiada orientacyjnej liczbie osób przebywających jednocześnie wokół świątyni w dniach pielgrzymki. Unikanie kolizji zostało zapewnione przez zmodyfikowany algorytm RVO (opisany wcześniej). Agenci są charakteryzowani nie tylko przez swoje położenie, ale również dodatkowe, opisujące ich cechy (np. wiek) oraz zachowanie – automat skończony odzwierciedla przebieg ceremoniału. Zaproponowane podejście zostało zweryfikowane przez porównanie z faktycznymi zdjęciami z Mekki. Model nie uwzględnia jednak zachowań grupowych, przez co nie oddaje pewnych złożonych interakcji (np. przemieszczających się razem grup wewnątrz tłumu).

Autorzy algorytmu „PLEdestrians” [12] zaproponowali modyfikację pozwalającą na uzyskanie płynniejszego ruchu agentów – możliwe jest to dzięki zastosowaniu zasady minimalnego wysiłku. Agent, podejmując decyzję, obiera najkrótszą drogę do celu, starając się jednocześnie poruszać się ze swoją preferowaną szybkością. Zapewnia to wybór bardziej naturalnych ścieżek ruchu (rys. 3). W pracy przedstawiono porównanie z klasycznym podejściem *Social Force*, gdzie w celu uniknięcia kolizji agenci zmuszeni są do nagłej zmiany prędkości lub kierunku. Przyjęcie zasady minimalnego wysiłku powoduje, że agenci mijają się po znacznie łagodniejszych łukach. Pokazuje to, jak istotne dla zapewnienia naturalnego ruchu jest wzbogacenie sztucznej inteligencji na poziomie psychologicznym.



Rys. 3. Dwoch agentów (gwiazdki) poruszających się do celów (kółka); linia czerwona – trajektoria modelu *Social Force*, linia niebieska – trajektoria modelu *PLEdestrians*; źródło: [12]

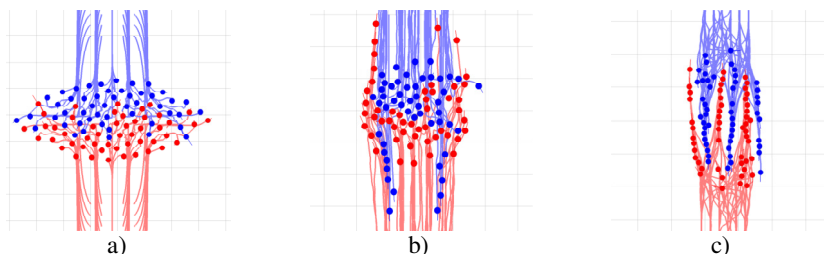
Fig. 3. Two agents (stars) moving to targets (circles); red line – *Social Force* trajectory, blue line – *PLEdestrians* trajectory; source: [12]

Na to, jak istotny jest aspekt psychologiczny, zwrócili również uwagę autorzy pracy [13]. W zaproponowanym przez siebie podejściu uwzględnili trzy wymiary osobowości zgodnie z teorią Hansa Eysencka. Są to: ekstrawersja lub zajmująca przeciwny biegun introwersja, neurotyzm (oznaczający chwiejność emocjonalną) oraz psychotyczność (czyli empatia lub jej brak). Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano bibliotekę

RVO2. Agenci o różnych modelach osobowości wykazują różną skłonność do zbliżania się do innych agentów, dążenia do celu etc. Pozwala to na uzyskanie odmiennych ścieżek dla każdego typu agentów. Mogłoby to służyć nie tylko uzyskaniu bardziej realistycznego ruchu, ale również rozpatrywaniu złożonych scenariuszy typu ewakuacja i różne zachowania w sytuacji zagrożenia.

Zazwyczaj algorytmy symulacji zachowania tłumu bazują na lokalnym unikaniu kolizji – pod uwagę brane jest jedynie bezpośrednie sąsiedztwo, natomiast odleglejsi agenci są ignorowani w procesie podejmowania decyzji. Problem pojawia się, gdy w zasięg naszej reakcji wchodzi grupa agentów – skutkuje to nagłymi zmianami trajektorii ruchu (unikając jednych agentów, wchodzimy w konflikt z innymi) oraz wzajemnym blokowaniem się agentów. W celu uzyskania bardziej realistycznych zachowań konieczne jest uwzględnienie przez sztuczną inteligencję szerszego zakresu sąsiedztwa. Sprawdza się to jednak jedynie w wypadku niezbyt licznych grup. W [14] zaproponowano rozwiązanie tego problemu. Autorzy zastosowali podejście hybrydowe – w bliskim sąsiedztwie kolizje rozpatrywane są na poziomie pojedynczych agentów, natomiast odległe grupy traktowane są całościowo. Pozwala to na wyszukiwanie ścieżek omijających największe skupiska agentów. Uzyskiwane w ten sposób trajektorie są gładkie i bliższe realnie obserwowanym zachowaniom. Autorzy przedstawili w pracy porównanie wyników uzyskanych przy pomocy zaproponowanego hybrydowego rozwiązania z klasycznym podejściem RVO. Przykładowy scenariusz idących naprzeciw siebie grup w podejściu RVO powoduje krótkotrwałą blokadę, gdy spotykają się agenci zaczynają się mijać. Zwiększenie zasięgu branego pod uwagę powoduje, że agenci zawczasu modyfikują swoją trajektorię, by ominąć zderzającą z naprzeciwka grupę.

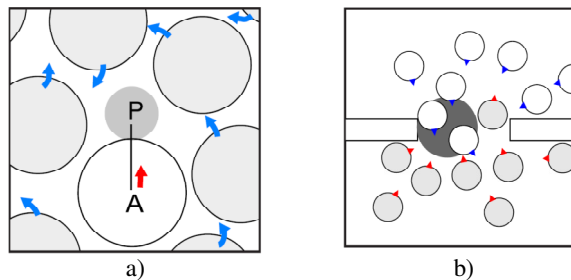
Inne rozwiązanie tego problemu zaproponowano w pracy [15]. Przedstawiona tam metoda *Synthetic Vision* ustala trajektorie agentów na podstawie symulowanej widoczności. Agenci wykrywają zagrożenie kolizją w obserwowalnym zasięgu otoczenia, a następnie odpowiednio modyfikują swój ruch: hamują, aby zapobiec bliskim kolizjom lub zmieniają orientację, aby zawczasu zapobiec dalekim. Autorzy przedstawili porównanie na kilku testowych scenariuszach z metodami RVO oraz *Social Force* (rys. 4). Można w nich zaobserwować charakterystyczne zachowanie: grupa rozdziela się na kilka strumieni, aby uniknąć kolizji z grupą blokującą jej drogę do celu.



Rys. 4. Dwie zderzające się grupy: a) *Social Force Model*; b) RVO; c) *Synthetic Vision*; źródło: [15]

Fig. 4. Two groups heading toward each other: a) *Social Force Model*; b) RVO; c) *Synthetic Vision*; source: [15]

Bardzo interesującą propozycję przedstawiono w pracy [16]. W celu modelowania specjalnych sytuacji (głównie grupowych zachowań, wymagających interakcji kilku agentów) wprowadza pojęcie „agentów złożonych”. Agent złożony jest połączeniem agenta bazowego i skojarzonych z nim „pełnomocników” (ang. *proxies*), których zachowanie zależy od agenta głównego. Najprostszym przykładem takich pełnomocników są ramiona człowieka – poruszają się wraz z nim, zachowując jednak pewną autonomię, mogą gdzieś sięgać, blokować drogę, być omijane. Uwzględnienie ich w modelu pozwala na bardziej realistyczną symulację. W opisywanej pracy pełnomocnicy służyli do modelowania pewnych szczególnych sytuacji, jak np. ruch agenta agresywnego (wówczas pełnomocnik rezerwuje drogę przed nim, aby nie zajęli jej inni agenci – rys. 5a), pierwszeństwo w wejściu (pełnomocnik zajmuje przejście, przepuszczając tylko jeden typ agentów, dopóki są oni obecni – rys. 5b), ruch w szyku (np. policja przemierzająca się w tłumie), ruch matki z dzieckiem (pełnomocnik matki chroni i prowadzi dziecko). Przykłady podobnych zastosowań można mnożyć.



Rys. 5. Przykłady pełnomocników: a) agresja, b) pierwszeństwo; źródło: [16]

Fig. 5. Proxies examples: a) aggression, b) priority; source: [16]

## 5 Dobór parametrów modelu

Ważnym aspektem badań jest sprawdzenie poprawności zaprojektowanego modelu. W ocenie zgodności modelu z rzeczywistością, można posłużyć się współczynnikami jakościowymi i ilościowymi [3]. Współczynnikiem jakościowym jest fakt występowania w modelu pewnych zjawisk znanych z rzeczywistości (np. strug w swobodnym ruchu pieszych). Wiąże się z tym zjawisko emergencji, czyli powstawania nowych zachowań w wyniku prostych oddziaływań. Współczynniki ilościowe dotyczyć będą obserwowanych wartości gęstości czy przepływu. Podstawowym instrumentem jest w tym wypadku wykres fundamentalny (ang. *fundamental diagram*) przedstawiający relację gęstości tłumu do szybkości poruszania się agentów.

Związanemu z tym zagadnieniu poświęcono pracę [17]. Dotyczy ona estymacji parametrów agentowych modeli symulacji tłumu. W tym celu w pracy porównywano wyniki symulacji z danymi referencyjnymi. Zbadano w ten sposób kilka popularnych podejść, w tym *Boids* Reynoldsa, *Social Force Model* Helbinga i *RVO2* van der Berga. Przy porównaniu rozważano kilka miar – zarówno makro (np. diagram fundamentalny czy wirowość, rozumiana jak w dynamice płynów – jako lokalny kąt cyrkulacji), jak i mikro (między innymi różnice w położeniu agentów, długości ścieżek czy odległości

od innych agentów). Wykorzystano trzy techniki optymalizacji: podejście zachłanne, algorytmy genetyczne oraz symulowane wyżarzanie. W badaniu przetestowano kilka scenariuszy z różną liczbą mijających się agentów.

## 6 Możliwości rozwoju badań

Mówiąc o możliwościach rozwoju, warto zacząć od przyjrzenia się najważniejszym zastosowaniom i istniejącym projektom komercyjnym. Jak wspomniano we wprowadzeniu, najważniejsze zastosowania symulacji zachowania tłumu dotyczą planowania oraz wizualizacji. Z oprogramowania zajmującego się przede wszystkim symulacją można wymienić Quadstone Paramics (<http://www.paramics-online.com/>) czy PTV VISSIM (<http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/>). Są to systemy komercyjne, nastawione głównie na symulację ruchu ulicznego. Opierają się one na modelu *car-following* [18], symulując ruch na poziomie pojedynczych pojazdów. Wspomagają one zadania planowania transportu, poszukiwania rozwiązań urbanistycznych, synchronizacji sygnalizacji świetlnej, a także na przykład symulację ewakuacji czy obserwowanie wpływu zmian w układzie ulic. Symulacja przechodniów została tam dodana jako kolejny element modelu, pozwalający na rozpatrywanie wpływu ruchu pieszego na jezdny.

Rozwiązania nastawione przede wszystkim na wizualizację to na przykład Golaem Crowd (<http://www.golaem.com/>), Massive (<http://www.massivesoftware.com/>), czy Miarmy (<http://www.basefount.com/miarmy>). Są to pluginy do programu Maya firmy Autodesk – profesjonalnego pakietu do tworzenia grafiki i animacji 3D. Znajdują one zastosowanie w przygotowywaniu animacji na potrzeby gier, kina i telewizji (np. Massive został opracowany specjalnie na potrzeby trylogii „Władca pierścieni” Petera Jacksona). Odpowiadają one za sztuczną inteligencję i zachowania, zajmując się rozmieszczeniem i animacją modeli reprezentujących poszczególne osoby.

Istniejące rozwiązania nie wyczerpują problemu. Wciąż pozostaje miejsce dla nowych propozycji – przykładem jest PEDSIM (<http://pedsim.silmaril.org/>) – biblioteka o otwartym kodzie, udostępniona i rozwijana przez Christiana Gloora w ramach jego pracy doktorskiej [19]. Może być ona używana zarówno na potrzeby planowania, jak i animacji. Została wyposażona w program demonstracyjny, ale może być też bez przeszkód włączana do własnych projektów.

Wskazuje to, iż zagadnienie modelowania i symulacji zachowań tłumu pozostaje wciąż otwartym problemem. Istniejące podejścia pozostawiają miejsce na dalszy rozwój. Kierunki tego rozwoju dyktowane są zastosowaniem. W symulacji istotne wydaje się rozwinięcie poziomu psychologicznego, wzbogacającego sztuczną inteligencję. Pozwoli to na rozpatrywanie bardziej złożonych scenariuszy. W animacji bardziej istotny może być aspekt społeczny i tworzenie nowych poziomów interakcji między agentami oraz rozpatrywanie zdarzeń w dłuższych przedziałach czasowych.

Zainteresowania autora skupiają się na symulacji wielomodalnej, zakładającej współwystępowanie różnych rodzajów agentów – działających według różnych reguł. Pozwalałoby to nie tylko na łączenie różnych rodzajów ruchu (pojazdy i piesi), ale również na przykład wprowadzanie zachowań konfliktowych (interakcja z jednostkami agresywnymi), czy też zmianę zachowania w reakcji na czynniki zewnętrzne. W ramach prac nad tym tematem powstał projekt aplikacji, która pozwoli



na śledzenie zachowania tłumu w czasie rzeczywistym, w tym obserwowanie interakcji na poziomie poszczególnych agentów, czy badanie wpływu zmian środowiska oraz rozprzestrzeniania się informacji (np. czasu reakcji agentów w sytuacji alarmowej). Aplikacja jest w trakcie przygotowywania i zostanie przedstawiona w kolejnych publikacjach.

## 7 Podsumowanie

Niniejszy artykuł poświęcono mikroskopowemu podejściu do zagadnienia modelowania zachowania tłumu. Badanie dynamiki tłumu jest ważne z punktu widzenia wielu dziedzin, a podejście mikroskopowe pozwala śledzić zachowania i interakcje na poziomie pojedynczych agentów. W pracy przedstawiono różne modele – zarówno te najpopularniejsze, jak i ich interesujące modyfikacje oraz współczesne kierunki badań. Omówiono przy tym metody oparte na automatach komórkowych oraz modelowaniu agentowym, zwracając uwagę na trzy poziomy symulacji – fizyczny, psychologiczny i społeczny. Poruszono również temat badania zgodności modelu z rzeczywistością oraz najważniejsze zastosowania – symulację i animację. Nakreślono interesujące autora możliwości rozwoju oraz kierunek jego dalszych prac. Z pewnością można stwierdzić, że jest to ciekawa i rozwojowa tematyka, mająca praktyczne zastosowanie i stwarzająca miejsce dla wielu propozycji i rozwiązań.

## Literatura

1. Forsyth, D. R. (1999). *Group Dynamics* (3 ed.). Belmont, CA: Wadsworth Publishing
2. Zhou S., Chen D., Cai W., Lou L., Yoke M., Low H., Tian F.: Crowd Modeling and Simulation Technologies. *ACM Journal Name*, Vol. N, No. N, 01 2010, Pages 1-32
3. Wąs J.: Modelowanie dynamiki tłumu. *Pomiary. Automatyka. Robotyka*, 12/2011
4. Wolfram S.: Statistical Mechanics of Cellular Automata. *Reviews of Modern Physics*, 55 (3): 601–644
5. Dudek-Dyduch E., Wąs J.: Knowledge Representation of Pedestrian Dynamics in Crowd: Formalism of Cellular Automata. *ICAISC Lecture Notes in Computer Science*, 2006, Springer-Verlag, 1101-1110
6. Klüpfel H.: *A Cellular Automaton Model for Crowd Movement and Egress Simulation*. PhD thesis, University Duisburg–Essen, 2003
7. Reynolds C. W.: Steering behaviors for autonomous characters. In *Game Developers Conference*, 1999
8. Helbing D., Molnar P.: Social Force Model for Pedestrian Dynamics. *Phys. Rev. E* 51, 4282-4286, 1995
9. van den Berg J., Lin M. C., Manocha D.: Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Pasadena, Calif., May 19-23, 2008, pp. 1928-1935
10. van den Berg J., Guy S. J., Lin M. C., Manocha D.: Reciprocal n-body collision avoidance. Cédric Pradalier, Roland Siegwart, and Gerhard Hirzinger (eds.), *Robotics Research: The 14th International Symposium ISRR, Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol. 70, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, Germany, May 7, 2011, pp. 3-19

11. Curtis S., Guy S. J., Zafar B., Manocha D.: Virtual Tawaf: A Case Study in Simulating the Behavior of Dense, Heterogeneous Crowds. *1st IEEE Workshop on Modeling, Simulation and Visual Analysis of Large Crowds*, 2011
12. Guy S. J., Chhugani J., Curtis S., Dubey P., Lin M., Manocha D.: PLEdestrians: A Least-Effort Approach to Crowd Simulation. *Eurographics/ ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, 2010
13. Guy S. J., Kim S., Lin M. C., Manocha D.: Simulating Heterogeneous Crowd Behaviors Using Personality Trait Theory. *Eurographics/ ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, 2011
14. Golas A., Narain R., Curtis S., Lin M.: Hybrid Long-Range Collision Avoidance for Crowd Simulation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG)*, 2013
15. Ondrej J., Pettre J., Olivier A.-H., Donikian S.: A synthetic-vision based steering approach for crowd simulation. *ACM Trans. Graph.* 29 (4), pp. 123-123, 2010
16. Yeh H., Curtis S., Patil S., van den Berg J., Manocha D., Lin M.: Composite Agents. University of North Carolina at Chapel Hill. *Eurographics/ ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, 2008
17. Wolinski D., Guy S. J., Olivier A. H., Lin M., Manocha D., Petré J.: Parameter Estimation and Comparative Evaluation of Crowd Simulations. *Eurographics*, Vol. 33, No. 2, 2014
18. Fritsche H.-T.: A model for traffic simulation, in *Traffic Engineering & Control*, 35, 1994
19. Gloor C.: *Distributed Intelligence in Real-World Mobility Simulations*. PhD Thesis, 2005-2014

## Streszczenie

Niniejsza publikacja dotyczy zagadnienia modelowania ruchu tłumu z wykorzystaniem podejścia mikroskopowego. Podejście takie skupia się na zachowaniach i interakcjach zachodzących na poziomie pojedynczych osobników. W pracy przedstawiono różne modele (oparte na automatach komórkowych oraz modelowaniu agentowym), omówiono też współczesne kierunki badań oraz najważniejsze zastosowania. Nakreślono również możliwości rozwoju oraz kierunek dalszych prac autora.

**Słowa kluczowe:** modelowanie tłumu, systemy agentowe, automaty komórkowe, mikrosymulacja

## **Microscopic approaches in crowd behaviour modeling - a review**

### **Summary**

This publication refers to the microscopic approach to the crowd modeling and simulation. This approach focuses on the behavior and interactions occurring at the level of single individuals. The paper presents models based on cellular automata and agent based modeling, discusses the current trends in research and the most important applications. Also outlines the opportunities and the direction of future work of the author.

**Keywords:** crowd modeling, multi-agents systems, cellular automata, microsimulation

Praca finansowana w ramach badań statutowych Wydziału Informatyki Politechniki Białostockiej nr S/WI/2/2013.

