

УДК 004.942:519.876

DOI: <https://doi.org/10.53920/ITS-2024-1-3>

Роман Володимирович ЗІНЬКО,

доктор технічних наук, професор,
Національний університет «Львівська політехніка»

ORCID ID: [0000-0002-3275-8188](https://orcid.org/0000-0002-3275-8188)

Олександр Миколайович МАКОВЕЙЧУК,

доктор технічних наук,
Заклад вищої освіти «Міжнародний науково-технічний університет
імені академіка Юрія Бугая»

ORCID ID: [0000-0003-4425-016X](https://orcid.org/0000-0003-4425-016X)

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ПАСАЖИРІВ У ТРАНСПОРТНОМУ ЗАСОБІ НА ОСНОВІ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ

У даній роботі розглянуто мультиагентну модель симуляції руху натовпу на основі клітинних автоматів на прямокутній сітці. Для моделювання руху використовувалась стрес-модель, де поведінка агентів визначається різними факторами стресу: міжособистісними (намагання уникати скупченості) та позиційними (намагання рухатися до заданої точки) та комбінована модель. Комбінована модель стресу поєднує ці два фактори, дозволяючи агентам приймати рішення, що враховують як необхідність уникнення скупченості, так і потребу рухатися до цілі. Міжособистісний стрес розраховується як сума агентів у сусідніх клітинках, і агенти намагаються рухатися до клітинки з найменшою кількістю сусідів. Цей підхід дозволяє мінімізувати конфлікти і перенаселення. Позиційний стрес враховує відстань до заданої цілі, дозволяючи агентам рухатися в напрямку цієї цілі. При цьому для розрахунку траєкторії руху агентів використовується хвильовий алгоритм, що дозволяє уникати колізій і знаходити оптимальні шляхи для досягнення цілі.

Моделювання і візуалізація результатів показали, що запропонована модель ефективно відтворює рух пасажирів у транспортному засобі, демонструючи адекватність і точність запропонованого підходу.

Ключові слова: симуляція натовпу, мультиагентні моделі, клітинні автомати, міжособистісні стресори, позиційні стресори, хвильовий алгоритм.

Roman ZINKO,

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Lviv Polytechnic National University

Oleksandr MAKOVEICHUK

Doctor of Technical Sciences
Higher Education Institution «Academician Yuriy Bugay International
Scientific and Technical University»

PASSENGER MOVEMENT SIMULATION IN A VEHICLE BASED ON CELLULAR AUTOMATA

This paper discusses a multi-agent crowd movement simulation model based on cellular automata on a rectangular lattice. The study focuses on two main aspects of stress: interpersonal stress, which arises from agents' efforts to avoid overcrowding and contact with other agents, and positional stress, which arises from agents' efforts to reach a specific goal. The combined stress model integrates these two factors, allowing agents to make decisions that consider both the necessity to avoid overcrowding and the need to move towards a goal. Interpersonal stress is calculated as the sum of agents in neighboring cells, and agents try to move to the cell with the fewest neighbors. This approach helps minimize conflicts and overcrowding. Positional stress considers the distance to the specified goal, allowing agents to move in the direction of the goal. The wave algorithm is used to calculate the agents' movement trajectories, which helps avoid collisions and find optimal paths to the goal.

Modeling and visualization of the results showed that the proposed model effectively reproduces the movement of passengers in a transport vehicle, demonstrating the adequacy and accuracy of the proposed approach.

Keywords: crowd simulation, multi-agent model, cellular automata (CA), interpersonal stressors, positional stressors, wave algorithm.

Постановка проблеми. Симуляція натовпу (crowd simulation), – це процес моделювання руху і поведінки великої кількості індивідуальних агентів (людей або тварин) у різних середовищах [1]. Ця технологія використовується для відтворення реалістичних сценаріїв, таких як евакуації з будівель, поведінка натовпу на масових заходах, рух пішоходів у міських умовах та багато іншого [2, 3].

Одним із теоретично цікавих та практично важливих застосувань симуляції натовпу є дослідження руху пасажирів у транспортних засобах [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мультиагентне моделювання руху у транспортних засобах є важливим напрямком досліджень у сфері моделювання руху натовпу. Основні аспекти симуляції включають фізичні, психологічні та соціальні фактори, які впливають на поведінку окремих осіб та груп [5].

Тим не менш, для моделювання динаміки натовпу можна використовувати спрощені дискретні моделі, такі як клітинні автомати (cellular automata, CA). Це математичні об'єкти з дискретним простором та часом, які керуються простим набором правил [6–8].

Ця робота є логічним продовженням циклу статей авторів [9–12], написаних у парадигмі мультиагентного моделювання. На відміну від матеріалів конференції [12], де основний акцент робився на практичній проблемі наповненості пасажирських салонів та оцінці ефективності компоновки транспортного засобу, ця стаття має більш теоретичний характер. Під час роботи над статтею було оптимізовано MATLAB-код програмної реалізації та оновлено результати моделювання (див. посилання на github [13]).

Мета статті – розглянути модель симуляції руху натовпу на основі клітинних автоматів та продемонструвати, що ця модель адекватно описує рух пасажирів у транспортному засобі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо модельну задачу опису динаміки руху пасажирів. Будемо вважати для простоти, що поведінка модельних агентів задається на прямокутній ґратці, при цьому за 1 крок моделювання, агент, що займає 1 клітинку, може зміщуватися не більше, ніж на 1 клітинку.

Транспортний засіб представляє собою прямокутну область клітинок, де задано точки входу і виходу пасажирів, всі решта точок є еквівалентними (рис. 1).

Для моделювання руху агентів використовуються так звані стрес-моделі, в яких поведінка залежить від різних факторів стресу: міжособистісні стресори (interpersonal stressors) – намагання уникати скупченості [13, 14], позиційні стресори (positional stressors) – намагання рухатися у задану точку [13, 15] і комбінована модель, що враховує обидва фактори.

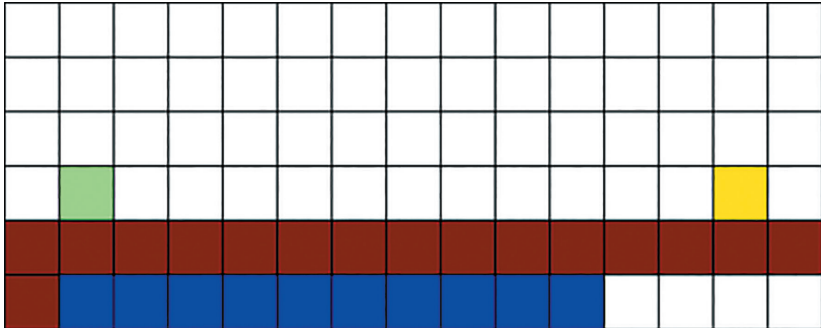


Рис. 1. Модельний всесвіт задачі: нагорі зображено порожній транспортний засіб («автобус»), зелена клітинка – точка входу («вхідні двері»), жовта – точка виходу («вихідні двері»); знизу під розділяючою коричневою лінією умовно показано модельних агентів («пасажирів на зупинці»)

Кожен агент рухається у точку із мінімальним значенням стресора, при цьому для уникнення колізій траєкторія руху розраховується за допомогою т. зв. хвильового алгоритму [16–17].

Міжособистісний стресор I_i задається для кожної точки з координатами $p(x, y)$ модельного всесвіту B у вигляді

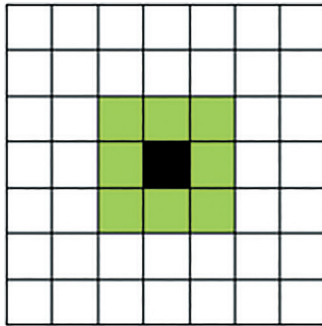
$$I_i(p) = \sum_{p' \in \omega} B(p - p') \quad (1)$$

де $p' \in \omega$ – всі точки, що належать деякому ω -околу точки p .

Якщо в якості ω -околу розглядається окіл Мура (Moore neighborhood) [16] (див. рис. 2), то рівняння (1) можна записати у явному вигляді:

$$I_i(x, y) = (B * w)_{x,y} \quad (2)$$

де символ $*$ означає згортку, а матриця $w = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ задає окіл точки.



**Рисунок 2. Окіл Мура
(сукупність восьми клітин
на квадратному паркеті,
що мають спільну вершину
з даною клітиною)**

Для спрощення під час симуляції використовувався не 8-, а 4-зв'язний окіл Мура з матрицею $w = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$.

Таким чином, у даному випадку модель міжособистісного стресору представляє собою суму сусідів в околі точки, при цьому рух буде йти в точки, де кількість цих сусідів є мінімальною.

Позиційний стресор $I_p(p, p_0)$ задається для поточної точки $p = p(x, y)$ і деякої («цільової») точки p_0 як

$$I_p(p, p_0) = \text{const} \cdot \|p - p_0\| \quad (3)$$

Не втрачаючи загальності, можна прийняти, що $\text{const} = 1$. У даному випадку доцільно розглядати L_1 -норму.

Таким чином, узагальнена модель стресора, що розглядається у даній статті може бути представлена як

$$I = \alpha I_i + \beta I_p \quad (4)$$

або

$$I(p) = \alpha \sum_{p' \in \omega} B(p - p') + \beta \|p - p_0\|_1 \quad (5)$$

де α і β – деякі вагові коефіцієнти.

При цьому, для $\alpha = 0, \beta = 1$ отримується модель міжособистісного стресора, для $\alpha = 1, \beta = 0$ маємо модель позиційного стресору, а для $\alpha = 1, \beta = 1$ – комбіновану модель. В якості цільової точки p_0 пропонується обрати точку виходу.

У загальному алгоритм моделювання можна представити як послідовність таких кроків:

- 1) ініціалізація модельного всесвіту B , задання кількості частинок;
- 2) доки не досягнуто максимальної кількості кроків моделювання T :
 - якщо не всі модельні агенти задіяні, додати 1 агента у точку входу;
 - для кожного модельного агента, що знаходиться у точці p^a :
 - порахувати матрицю стресору $I(p)$ за формулою (5) для кожної доступної точки $p = p(x, y)$;
 - знайти точку $p' = \arg \min_p I(p)$;
- 3) за допомогою хвильового алгоритму побудувати траєкторію руху $w = w(p^a, p')$ і, якщо така траєкторія існує, перейти у наступну точку по цій траєкторії.

Зауважимо, що послідовність модельних агентів на кожному кроці доцільно розглядати у випадковому порядку.

Результати моделювання за цим алгоритмом для комбінованої моделі показано на рисунках 3 та 4.

Зауважимо, що аналізуючи динаміку руху порівняно великої кількості модельних агентів, ми не отримуємо стаціонарної конфігурації агентів, що пов'язано з тим, що вони «заважають» один одному і допустимі траєкторії на кожному кроці змінюються. Уникнути цього (для отримання більш реалістичних результатів, що узгоджуються з практикою) можна, якщо ввести додаткову умову, що рух відбувається тільки у випадку, якщо наступний крок по траєкторії гарантовано зменшує значення стресорів. Для аналізу стаціонарних конфігурацій динаміки руху, зручно усереднити результати моделювання для достатньо великої кількості кроків, як це показано на рис. 5.

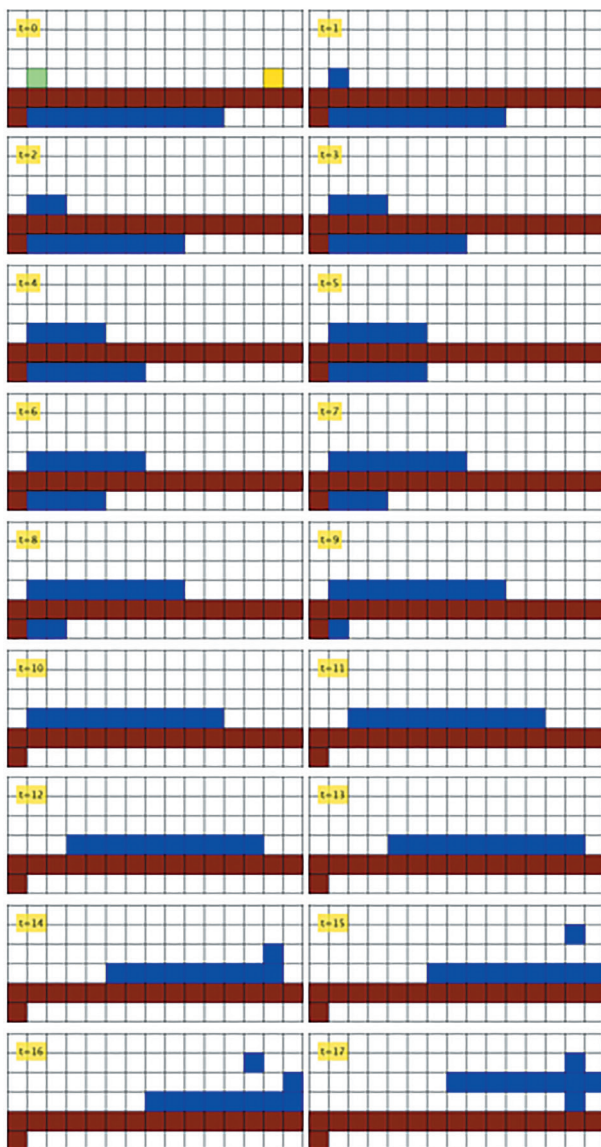


Рис. 3. Динаміка руху 10 модельних агентів для ітерацій від 0 до 17, (комбіновані стресори, $\alpha = 1, \beta = 1$)

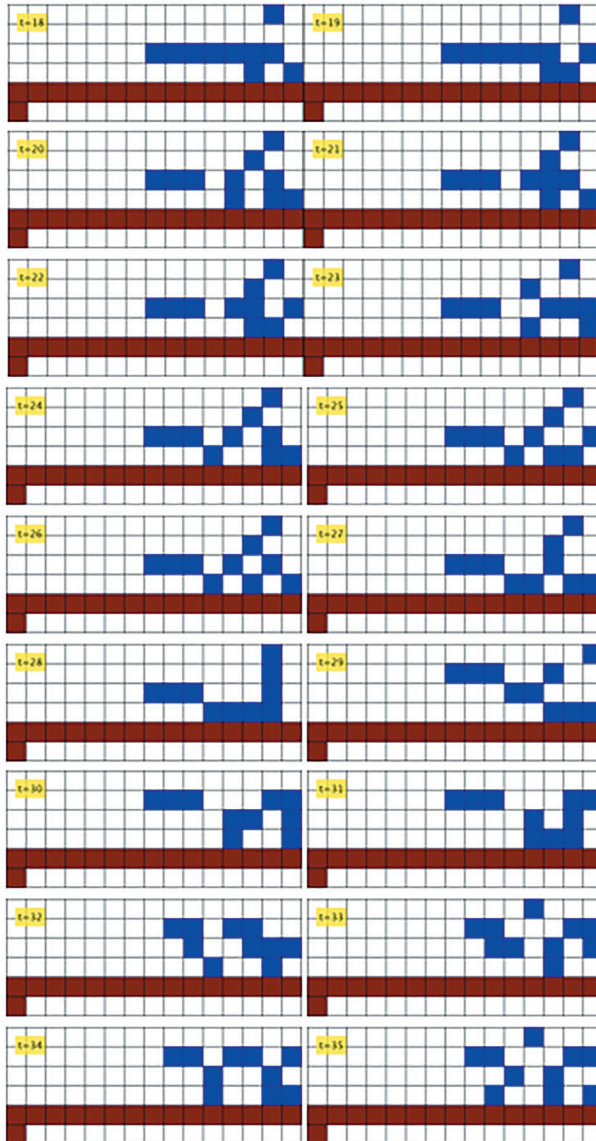


Рис. 4. Динаміка руху 10 модельних агентів для ітерацій від 18 до 35, (комбіновані стресори, $\alpha = 1, \beta = 1$)

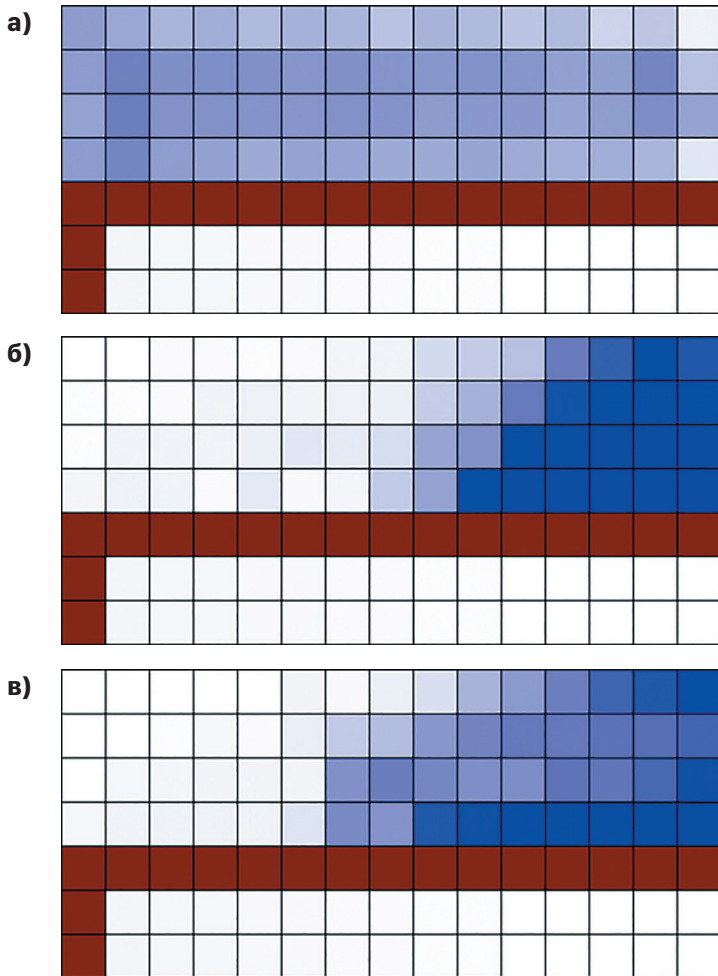


Рис. 5. Результати моделювання для 20 модельних агентів, що усереднені по $T = 1000$ кроків для різних моделей поведінки:
а) міжособистісні стресори (Interpersonal stressors), $\alpha = 0, \beta = 1$;
б) позиційні стресори (Positional stressors), $\alpha = 1, \beta = 0$;
в) комбіновані стресори, $\alpha = 1, \beta = 1$

Висновки та пропозиції. На основі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- модель, що враховує міжособистісні стресори, показує з часом статистично рівномірний розподіл модельних агентів майже по всій області, за виключенням точки входу (в ній обов'язково з'являється кожний агент на старті своєї історії) та дальніх кутових точок (цей ефект мав би зникати при збільшенні кількості кроків усереднення);
- модель, що враховує тільки позиційні стресори, показує компактний розподіл в околі точки виходу;
- комбінована модель, як і очікувалось, дає проміжні результати – розподіл групується в околі точки виходу, але є недостатньо компактным у порівнянні з моделлю, що враховує тільки позиційні стресори.

Ці результати є адекватними і узгоджуються із спостереженнями.

Як напрямок подальших досліджень, доцільно доповнити модель і провести такі експерименти:

- додати асиметрію точок транспортного засобу (місця «для сидіння» vs місця «для стояння», місця «біля вікна» тощо);
- промоделювати процес виходу пасажирів;
- промоделювати вплив позиційного стресору, що максимізує віддаленість від точки входу.

© **Зінько Р.В., Маковейчук О.М., 2024**

ЛІТЕРАТУРА

1. Thalmann, D. (2016). Crowd Simulation. In: Lee, N. (eds) *Encyclopedia of Computer Graphics and Games*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-08234-9_69-1.

2. Comptdaer, J., Chiva, E., Delorme, S., Morlaye, H., Volpoët, J., & Balet, O. (2007). Multi-scale Behavioral Models for Urban Crisis Training Simulation. In *Proceedings of BRIMS, 16th conference on behavior representation in modeling and simulation*, Norfolk.

3. Gwynne, S., Galea, E. R., Owen, M., Lawrence, P. J., & Filippidis, L. (1999). A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment. *Building and Environment*, 34(6), 741-749. DOI: 10.1016/S0360-1323(98)00057-2.

4. Daamen, W., & Hoogendoorn, S. P. (2004). Pedestrian and Evacuation Dynamics. In *Modelling passenger flows in public transport facilities*. Proceedings of the 2nd International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED 2003), 59-73.
5. Khan, S. I., Bacelli, G., & Hunter-Zaworski, K. (2008). Modeling passenger boarding and alighting time for buses. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(2), 108-118.
6. Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A., & Zittartz, J. (2001). Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 295(3-4), 507-525. DOI: 10.1016/S0378-4371(01)00141-8.
7. Kirchner, A., & Schadschneider, A. (2002). Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 312(1-2), 260-276. DOI: 10.1016/S0378-4371(02)00857-9.
8. Blue, V. J., & Adler, J. L. (2001). Cellular automata micro-simulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B: Methodological*, 35(3), 293-312. DOI: 10.1016/S0191-2615(99)00052-1.
9. Маковейчук, О. М. (2007). Моделювання транспортних потоків методами клітинкових автоматів. *Наук. вісник НЛТУ України: Зб. наук.-техн. праць*, 17(4), 269-271.
10. Маковейчук, О. М., Зінько, Р. В. (2007). Принципи організації анізотропного середовища для клітинкових автоматів. *Наук. вісник НЛТУ України: Зб. наук.-техн. праць*, 17(5), 210-213.
11. Зінько, Р. В., Маковейчук, О. М. (2007). Принципи формування інтелектуальної транспортної системи. *Науковий вісник НЛТУ України*, 17(6), 280-285.
12. Mazurkiewicz, A., Zinko, R., Makoveichuk, O., & Polishchuk, O. (2023). Simulation of passenger movement dynamics in a vehicle. *MATEC Web Conf.*, 375, 02004. DOI: 10.1051/mateconf/202337502004.
13. <https://github.com/omakovychuk/CA>.
14. Patil, S., Van Den Berg, J., Curtis, S., Lin, M. C., & Manocha, D. (2011). Directing Crowd Simulations Using Navigation Fields. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(2), 244-254. PMID 21149879. DOI: 10.1109/TVCG.2010.33.
15. Guy, S. J., Kim, S., Lin, M. C., & Manocha, D. (2011). Simulating heterogeneous crowd behaviors using personality trait theory. In *Proceedings of the 2011 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation - SCA '11*, 43-52. DOI: 10.1145/2019406.2019413.

16. Kim, S., Guy, S. J., Manocha, D., & Lin, M. C. (2012). Interactive simulation of dynamic crowd behaviors using general adaptation syndrome theory. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games - I3D '12*, 55-62. DOI: 10.1145/2159616.2159626.

17. Moore, E. F. (1959). The shortest path through a maze. In *Proceedings of an International Symposium on the Theory of Switching (Cambridge, Massachusetts, 2-5 April 1957)*. Harvard University Press, Vol. 2, 285-292.

18. Lee, C. Y. (1961). An Algorithm for Path Connections and Its Applications. *IRE Transactions on Electronic Computers*, EC-10(2), 364-365. DOI: 10.1109/TEC.1961.5219222.

REFERENCES

1. Thalmann, D. (2016). Crowd Simulation. In: Lee, N. (eds) *Encyclopedia of Computer Graphics and Games*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-08234-9_69-1.

2. Comptdaer, J., Chiva, E., Delorme, S., Morlaye, H., Volpoët, J., & Balet, O. (2007). Multi-scale Behavioral Models for Urban Crisis Training Simulation. In *Proceedings of BRIMS, 16th conference on behavior representation in modeling and simulation*, Norfolk.

3. Gwynne, S., Galea, E. R., Owen, M., Lawrence, P. J., & Filippidis, L. (1999). A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment. *Building and Environment*, 34(6), 741-749. DOI: 10.1016/S0360-1323(98)00057-2.

4. Daamen, W., & Hoogendoorn, S. P. (2004). Pedestrian and Evacuation Dynamics. In *Modelling passenger flows in public transport facilities*. Proceedings of the 2nd International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED 2003), 59-73.

5. Khan, S. I., Bacelli, G., & Hunter-Zaworski, K. (2008). Modeling passenger boarding and alighting time for buses. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(2), 108-118.

6. Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A., & Zittartz, J. (2001). Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 295(3-4), 507-525. DOI: 10.1016/S0378-4371(01)00141-8.

7. Kirchner, A., & Schadschneider, A. (2002). Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 312(1-2), 260-276. DOI: 10.1016/S0378-4371(02)00857-9.

8. Blue, V. J., & Adler, J. L. (2001). Cellular automata micro-simulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B: Methodological*, 35(3), 293-312. DOI: 10.1016/S0191-2615(99)00052-1.

9. Makoveychuk, O. M. (2007). Modeling of traffic flows by methods of cellular automata. of science Bulletin of the NLTU of Ukraine: Collection. science and technology works, 17(4), 269-271.

10. Makoveychuk, O. M., Zinko, R. V. (2007). Principles of organization of anisotropic environment for cellular automata. Science Bulletin of the NLTU of Ukraine: Collection. science and technology works, 17(5), 210-213.

11. Zinko, R. V., Makoveychuk, O. M. (2007). Principles of forming an intelligent transport system. Scientific bulletin of NLTU of Ukraine, 17(6), 280-285.

12. Mazurkiewicz, A., Zinko, R., Makoveichuk, O., & Polishchuk, O. (2023). Simulation of passenger movement dynamics in a vehicle. *MATEC Web Conf.*, 375, 02004. DOI: 10.1051/mateconf/202337502004.

13. <https://github.com/omakoveychuk/CA>.

14. Patil, S., Van Den Berg, J., Curtis, S., Lin, M. C., & Manocha, D. (2011). Directing Crowd Simulations Using Navigation Fields. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(2), 244-254. PMID 21149879. DOI: 10.1109/TVCG.2010.33.

15. Guy, S. J., Kim, S., Lin, M. C., & Manocha, D. (2011). Simulating heterogeneous crowd behaviors using personality trait theory. *In Proceedings of the 2011 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation - SCA '11*, 43-52. DOI: 10.1145/2019406.2019413.

16. Kim, S., Guy, S. J., Manocha, D., & Lin, M. C. (2012). Interactive simulation of dynamic crowd behaviors using general adaptation syndrome theory. *In Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games - I3D '12*, 55-62. DOI: 10.1145/2159616.2159626.

17. Moore, E. F. (1959). The shortest path through a maze. *In Proceedings of an International Symposium on the Theory of Switching* (Cambridge, Massachusetts, 2-5 April 1957). Harvard University Press, Vol. 2, 285-292.

18. Lee, C. Y. (1961). An Algorithm for Path Connections and Its Applications. *IRE Transactions on Electronic Computers*, EC-10(2), 364-365. DOI: 10.1109/TEC.1961.5219222.

СТАТТЯ НАДІЙШЛА ДО РЕДАКЦІЇ 20.05.2024