

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ПІШОХОДІВ НА ОСНОВІ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ

О.С МАКАРЕНКО, Д.А КРУШИНСЬКИЙ

Представлено клітинно-автоматний метод моделювання ситуацій, що виникають під час руху пішоходів, особливо під впливом непередбачуваних зовнішніх факторів. Розглянуто КА моделі, здатні відтворювати більшість явищ цього руху, обґрунтовано їхнє удосконалення шляхом введення ментальних особливостей.

ВСТУП

Упорядкований рух пішоходів набуває великого значення в процесі розвитку міст. Коли зростає кількість його учасників, стають першорядними розробка інфраструктури й планування засобів та сценаріїв керування масовим рухом людей навіть у повсякденному житті. З виникненням будь-яких надзвичайних ситуацій, що зумовлені природними катаклізмами (пожежі, повені, урагани і т.ін.), техногенними аваріями або безпосередньо людською діяльністю (терористичні акти, заворушення під час масових подій), ці питання актуалізуються. Отже, виникає проблема моделювання, яке дасть змогу, по-перше, краще зрозуміти закономірності, притаманні натовпу; по-друге, виявити «вразливі місця» в існуючій інфраструктурі та планах евакуації; по-третє, — оптимально проектувати нові ситуації. Все це потребує адекватних і, бажано, швидких в обчисленні моделей.

Першою спробою спрогнозувати рух пішоходів було застосування відомих моделей фізичних явищ у соціальній сфері. Однак, хоча методи фізики тривалий час використовувалися для дослідження руху транспортних засобів [1], динаміка пішохідних потоків залишалася мало вивченою [2] часто через те, що двовимірна природа робить неможливим її опис в межах простих класичних моделей. Водночас було помічено такі явища, як синхронізація, блокування, формування смуг руху (зокрема, у випадку протилежно спрямованих потоків), ударні хвилі, осциляції тощо.

Особливість об'єкту дослідження — наявність різних режимів (тобто явищ), що виникають під час паніки, вони суттєво відрізняються від тих, які спостерігаються у «звичайних» ситуаціях. При цьому необхідно мати модель, що була б здатна викласти і увібрати весь спектр притаманних руху натовпу явищ у деякий уніфікований спосіб. До певного часу досить популярною була модель соціальних сил [3], в межах якої можна досить точно відтворити реальну поведінку [4]. В цій безперервній моделі пішоходи взаємодіють через відштовхуючу (соціальну) силу, значення якої експоненційно падає з відстанню між ними. Це означає, що на кожному кроці моделі з N пішоходами потрібно оцінювати $O(N^2)$ взаємодій. Тим паче, що

за складної геометрії середовища (розташуванні перешкод) спостерігається ситуація, коли два пішоходи, що знаходяться поруч, не взаємодіють через наявність між ними «стіни». Тому, загалом, необхідно додатково перевіряти наявність взаємодії в кожній парі пішоходів. Для великих натовпів така процедура стає неможливою через обмеженість часу, що зумовлює потребу в нових підходах до моделювання та нових класах моделей.

Однією з найперспективніших методологій у моделюванні руху натовпу є так званий клітинно-автоматний підхід [5,6,7], відповідно до якого модель містить прості елементи, пов'язані локальною взаємодією з кількома «сусідами», причому їхня кількість обмежена певною малою константою. Це призводить до часової складності одного кроку моделі з N пішоходами $O(N)$ (на відміну від моделі соціальних сил з $O(N^2)$). Як правило, елементи розподілені на решітці з простою геометрією. Деталі цього підходу до характеристики натовпу пішоходів наведено нижче, але тут за приклад слід згадати гру «Життя» Дж. Конвея [8]. Останні дослідження КА фізиці та прикладній математиці засвідчили, що, незважаючи на простий опис елементів та правил їх взаємодії, динаміка КА може містити будь-які природні явища: самоорганізацію, хаос, складну поведінку всієї системи. Яскравими тут прикладами є моделювання гідродинаміки [9]. Таким чином, істотною перевагою застосування КА до моделювання руху натовпу є те, що прості (і, зазвичай, очевидні) правила, які оцінюють поведінку окремого пішохода, призводять до адекватного опису натовпу як складного об'єкта. При цьому така модель має ряд особливостей, успадкованих від КА, — лінійну часову складність, масштабність, стійкість до малих збурень (зокрема за ситуації і видалення/додавання пішоходів).

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ОПИС ТИПОВОЇ КЛІТИННО-АВТОМАТНОЇ МОДЕЛІ

Поведінку в сучасних моделях можна проранжувати від її заперечення й до використання штучного інтелекту. Адже класифікацію моделей можна зробити відповідно до двох складових: об'єкта моделювання (які саме особливості потоку пішоходів розглядаються) та засобів моделювання (які схвалюються гіпотези про зв'язок поведінки натовпу та параметрів пішоходів).

Відповідно до першої складової (об'єкта моделювання) самі моделі поділяють на імітаційні (макроскопічні), мікроскопічні (детерміновані моделі, кінетичні моделі, клітинні автомати) та моделі для прогнозування.

Відповідно до другої складової (засобів моделювання) моделі поділяють на: детерміновані та стохастичні (залежно від наявності випадкових величин у моделі); статичні та динамічні (залежно від організації моделі у часі); безперервні, дискретні та аналогові (залежно від методів представлення даних у моделі).

Докладно схарактеризуємо мікроскопічні, стохастичні, дискретні моделі, тотожні за особливостями до описаних у [4, 10]. Це означає, що правила поведінки висуваються для кожного пішохода окремо, правила переходу містять випадкові величини, простір та час мають дискретне представлення (через клітини та кроки відповідно). Основні припущення наступні:

- динаміка може бути представлена засобами КА, тобто моделі, дискретної у просторі та часі;
- бажаний шлях (маршрут руху) є безпосередньо заданим;

- ірраціональна поведінка є винятковою;
- пішоходи не є конкурентами: вони не травмують один одного;
- індивідуальні відмінності можна представити як параметри, що впливають на поведінку при пересуванні.

Наведемо коротке визначення КА. Це — дискретна динамічна система, що є множиною пов'язаних між собою ідентичних клітин, які утворюють решітку автомата. Решітки бувають різних типів, відрізняючись як за розміром, так і за «формою» клітин. Основні припущення у класичному клітинно-автоматному підході наступні:

- регулярність — це дискретний простір, дискретний час, дискретні стани клітин;
- динаміка — це локальний окіл, покрокові правила (детерміновані або стохастичні).

Нижче наведено опис КА відповідно до [11].

Нехай Zd — d -вимірна решітка; S — скінчена множина станів окремого елемента (клітини) решітки; s_i з S — стан i -клітини з Zd (i — індекс клітини). Конфігурація на решітці Zd — це сукупність станів всіх клітин в певний момент часу. Всі можливі конфігурації утворюють простір конфігурацій C на Zd . Нехай $T = \{0, 1, 2, \dots\}$ — дискретний час, $C(t)$ — конфігурація системи у момент часу t ($t = 0, 1, 2, \dots$). Локальне правило для клітини k з Zd — перетворення T_k , що переводить клітину зі стану $s_k(t)$ з S в момент часу t у стан $s_k(t+1)$ з S в наступний момент часу ($t+1$);

$$s_i(t+1) = T(N_i(t), R) = T(\{s_i(t)\}, R),$$

де N_k — певний окіл клітини k на решітці Zd ; $\{s_k(t)\}$ — множина станів клітин з N_k , результат перетворення T_k залежить лише від станів клітин в межах околу N_k (локальність); R — певні параметри правил, що задають перетворення. Набір локальних перетворень T_k визначає глобальне перетворення G на просторі конфігурацій C :

$$C(t+1) = G(C(t)).$$

Початкові дані для конфігурації $C(0)$ є заданими і відповідають моменту часу $t=0$. Множина всіх локальних перетворень $\{T_k\}$ або глобальне перетворення G визначають КА на решітці Zd з простором станів клітин S .

Кожна клітина — це завершений автомат, стан якого визначається станами «сусідніх» клітин та його станом. За апаратної реалізації КА, зазвичай, — гомогенні структури, яким притаманні наступні особливості [5, 6, 7]:

- решітка є однорідною;
- час є дискретним, крок у часі — незмінним;
- множина станів клітини містить інформацію про доступність останньої (є вона перешкодою чи ні);
- функція переміщення є детермінованою. Зміна значень всіх клітин відбувається одночасно (паралельно).

• клітини, що розташовані поблизу (навколо) заданої клітини, утворюють її оточення. Отже, оточення утворений саме множиною «сусідів», а не довільно обраних клітин (локальність). Але, в деяких моделях спостерігаються також і нелокальні взаємодії.

Розглянемо рух пішоходів (частинок) на площині, яка має перешкоди. Решітка є ортогональною з чотирма (оточення фон Неймана) або вісьмома (оточення Мура) можливими напрямками руху. Стан клітини відповідає наявності або відсутності частинки (пішохода) у заданій клітині. Наприклад, на рис. 1 наведено решітку з клітинами різних типів.

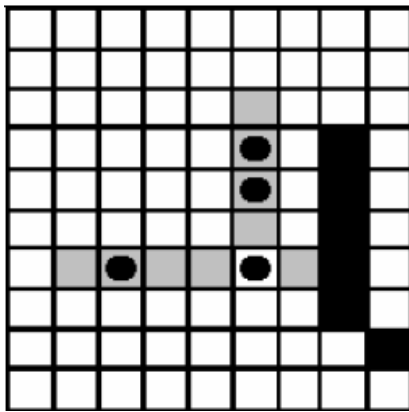


Рис. 1. Простір моделі. Чорні кола — це пішоходи, чорні клітини — перешкоди; сірі клітини — пошук у межах оточення окремих пішоходів

Кожна частинка намагається рухатись у певному напрямку, якщо ж такий рух неможливий (через наявність перешкоди або іншої частинки), вона змінює напрямок руху, продовжуючи дотримуватись глобального його напрямку. Кожна частинка рухається з певною швидкістю, що не перевищує задану максимальну межу v_{\max} .

Решітка КА — це набір двох прямокутних матриць $(F; V)$, F із елементами f_{ij} , де $f_{ij} \in \{0,1\}$ відповідає наявності (1) або відсутності (0) пішохода в заданій клітині. V — матриця з елементами v_{ij} , де $v_{ij} \in \{0,1\}$ відповідає наявності (1) або відсутності (0) перешкоди в заданій клітині.

Нижче описано модель для випадку оточення фон Неймана, коли зміна стану клітини залежить від чотирьох її «сусідів», чиє відносне положення позначається відповідно до чотирьох сторін світу: **N**, **W**, **S**, **E**, **C**. (Літери позначають: «north», «west», «south», «east» та «centre»).

Введемо змінну a , що може набувати значень **N**, **W**, **S**, **E**, **C** та наступних позначень для клітин в межах оточення заданої клітини:

$$f_{i+1j} = f_{ij}^{(N)}, f_{ij+1} = f_{ij}^{(E)}, \dots, f_{ij} = f_{ij}^{(C)}.$$

Подібні позначення вводяться і для елементів матриці V (які є «сусідами» певної клітини).

Правила переміщення з поточної клітини в одну з «сусідніх» наведено нижче (вони застосовуються тільки до тих клітин, для яких $f_{ij} = 1$). У моделі аналізується оточення кожної частинки, і для кожного кроку кожної частинки розраховуються ймовірності її зміщення в напрямку ближчих клітин. Кожна така ймовірність дорівнює нулю, якщо відповідна клітина в оточенні зайнята. Для «вільних» напрямків «проглядається» відстань r та аналізується кількість зайнятих/доступних клітин.

Насамперед, заборонено переміщатися в зайняті клітини та ті, що містять перешкоди:

$$P'_{ij} = (1/4)(1 - f_{ij}^{(a)})(1 - v_{ij}^{(a)}). \quad (1)$$

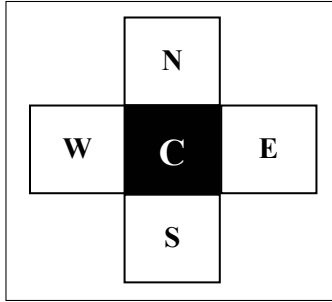


Рис. 2. Окіл клітини

Тобто, якщо хоча б одна з величин f_{ij} або v_{ij} дорівнює одиниці, що означає наявність пішохода або перешкоди, відповідно, то ймовірність переходу з клітини ij у напрямку a дорівнює 0. Для інших напрямків «простежується» окіл на відстань r (параметр моделі): підраховується кількість клітин, що лежать у відповідному напрямку та є вільними (від перешкод та інших частинок). Для реалізації цієї схеми ймовірності P''_{ij} зміщення в напрямку з

багатьма перешкодами зменшують:

$$P''_{ij}(a) = \left(1 - (1/r) \left(\sum_{k=1}^{r^*} f_{ij+k} + r - r^* \right) \right) P'_{ij}(a), \quad (2)$$

де r — максимальна дальність огляду; r^* — відстань від заданої клітини до найближчої перешкоди в обраному напрямку; $P'_{ij}(a)$ — імовірності, розраховані за формулою (1). Вираз (2) побудовано таким чином: що більша кількість пішоходів в напрямку a , тобто й більше значення суми $\sum_{k=1}^{r^*} f_{ij+k}$,

то інтенсивніше зменшується значення ймовірності переходу у цьому напрямку; множник $(1/r)$ забезпечує нормування. З іншого боку, що ближче значення r^* до r (найближча перешкода знаходиться біля межі огляду), то більш прийнятним є відповідний напрямок і множник при $P'_{ij}(a)$ прямує до 1.

Після цього зростає також ймовірність руху в обраному напрямку, наприклад N (бажаний напрямок руху вважається попередньо обраним у кожній клітині та відповідає найкоротшому шляху до певних цільових клітин):

$$\begin{aligned} P'_{ij}(N) &= P''_{ij}(N) + b \min [1 - P''_{ij}(N); P''_{ij}(S); P''_{ij}(W); P''_{ij}(E)]; \\ P_{ij}(S) &= P''_{ij}(S) - (b/3) \min [1 - P''_{ij}(N); P''_{ij}(S)]; \\ P_{ij}(E) &= P''_{ij}(E) - (b/3) \min [1 - P''_{ij}(N); P''_{ij}(E)]; \\ P_{ij}(W) &= P''_{ij}(W) - (b/3) \min [1 - P''_{ij}(N); P''_{ij}(W)]; \end{aligned} \quad (3)$$

де $b \in [0;1]$ — параметр, що визначає ступінь бажання дотримуватися обраного напрямку та приймає значення від 0 (таке бажання відсутнє) до 1 (обраний напрямок той самий за кожної нагоди). Легко зрозуміти, що при $b=0$ вирази (3) тривіально перетворюються на $P_{ij}(a) = P''_{ij}(a)$, $a \in \{N, W, S, E, C\}$. Натомість ($b \in [0;1]$) значення ймовірності переходу у бажаному напрямку збільшується на вказану величину. Рівні частки цієї ж величини віднімаються від усіх інших імовірностей, щоб забезпечити нормування ($\sum P_{ij}(a) = 1$).

Імовірності (3) розраховуються для кожної клітини в стані 1 (присутня частинка). Рух частинок із розрахованими для всіх напрямків імовірностями відбувається одночасно, решітки всіх клітин оновлюються.

Але під час переміщення частинки до вільних позицій не слід ігнорувати обставину, що на ці ж позиції може претендувати від двох до восьми «кандидатів». У таких випадках виникає конфлікт. Існує тільки один «чесний» спосіб його розв'язання: обрати одного з кандидатів із однаковими ймовірностями. Якщо швидкість пішохода перевищує 1, для запобігання складнішим конфліктам (перетин траєкторій руху) кожен часовий крок поділено на півкроки, причому швидкість кожної частинки в межах півкроку не перевищує 1. Цей метод розв'язання конфліктів є найпростішим та найефективнішим.

Той факт, що у випадку околу Мура діагональне переміщення клітини (через кут клітини) відповідає довшому просторовому кроку, зумовлює потребу у різній інтерпретації значення швидкості. Наприклад, маючи найбільшу можливу швидкість $v_{\max} = 5$, пішохід за один крок може зробити або 5 горизонтальних переміщень (через межу клітини), або 4 діагональні (через кут клітини).

На цьому опис клітинно-автоматної моделі руху пішоходів завершено. Таким чином, правила переміщення наступні:

- якщо є можливість, частинка рухається вперед (в іншому, дочасно заданому напрямку);
- в іншому випадку — частинка зміщується вправо, вліво або по діагоналі;
- наявність інших частинок та стін в будь-якому напрямку зменшує ймовірність зміщення в цьому напрямку.

Такий набір елементарних правил дозволяє імітувати «розумну» поведінку людей, що рухаються в групі.

ВРАХУВАННЯ МЕНТАЛЬНОСТІ

Врахування ментальності учасників соціальних процесів (рух пішоходів/автомобілів) — основна з тенденцій у побудові адекватних моделей та їх застосуванні. Є декілька шляхів до цього, зокрема, як прості статистичні правила, так і спроби моделювання людської свідомості та процесів ухвалення рішень засобами штучного інтелекту.

Тому основні чинники такі:

- особливості, які бажано враховувати у методології (А);
- підходи до формалізації провідних ідей методологій (В);
- в які моделі вводити ментальність та яким чином? (С).

Передбачувані результати врахування ментальних особливостей — це якісне розуміння систем та процесів, кількісне моделювання, прогнозування, побудова сценаріїв поведінки системи, оптимізація та керування системами та процесами.

Деякі відповіді можуть бути наступні:

- для А: поведінка, вибір, психологія, досвід з навчання та пам'ять, інтелект та ін.;

- для *B*: формалізація даних, статистика, анкетування, сенсорні дані та модельні концепції (економетрика, математичне моделювання, ігри та симуляції, штучний інтелект, теорія ігор, та ін.;
- для *C*: диференційні рівняння, статистичний аналіз, мультиагентний підхід, клітинні автомати тощо.

Раніше, розглядаючи модель із асоціативною пам'яттю, ми знайшли частковий спосіб та нові перспективи у врахуванні та інтерпретації ментальності в моделях великих соціо-економічних систем [12]. Як перший крок до цього ми пропонуємо застосувати нейромережу Хопфілда для моделювання внутрішньої структури клітин (елементів).

Деякий такий підхід придатний для КА моделей трафіка. Слід також зазначити, що певні ментальні особливості пішоходів можна реалізувати через правила навчання у реальному часі шляхом постійного оновлення у нейромережах [13].

Звісно, багато аспектів врахування ментальності потребує представлення у дослідженнях трафіків: моніторинг та розпізнавання ситуацій, процеси ухвалення рішень щодо напрямку руху, швидкості та цілей; можливості реалізації руху, когнітивні аспекти, тощо. Сьогодні врахування ментальності залишається достатньо складною проблемою. Наголосимо, що такі завдання є також актуальними для інших підходів — мультиагентних систем [6], master equation, нелінійних моделей.

Але однією з найцікавіших складових у соціальних системах є антисипація. Це здатність людини прорахувати свою поведінку, зважаючи на майбутні (прогнозовані) ситуації [14]. Тому подальшу частину статті присвячено запровадженню саме антисипації в рамках описаних вище КА моделей.

МОДЕЛЬ ПІШОХОДА З АНТИСИПАЦІЄЮ

На основі моделі, яку було описано вище, можна представити антисипуючого пішохода, спроможного передбачати розвиток ситуації у своєму безпосередньому оточенні та застосовувати ці знання для оптимізації певної характеристики натовпу у розглянутих нижче прикладах — часу евакуації.

Як ми зазначили, на кожний крок пішохода розраховуються ймовірності його зміщення (P_k , $k=1..4$ у випадку околу фон Неймана), котрі залежать тільки від поточного розташування перешкод у його безпосередньому оточенні. Саме через ці величини можна ввести антисипацію в модель. Припустимо, що пішоходи намагаються уникати зіткнень між собою, тобто пішохід прагне не потрапляти в певну клітину свого оточення, якщо у наступний момент часу вона буде зайнята (відповідно до його прогнозу) іншим пішоходом. Відповідно до цієї схеми ймовірності можна виправити, наприклад, наступним чином:

$$P_k \rightarrow P_k \cdot (1 - \alpha \cdot P_{k,3}), \quad (4)$$

де $P_{k,3}$ — ймовірність того, що k -а клітина з оточення буде зайнята на наступному кроці одним із «сусідів». Природно, що величини P_k підлягають нормуванню, оскільки їхня сума повинна дорівнювати 1 (якщо хоча б одна з цих ймовірностей більше 0). Слід зазначити, що за такого способу реалізації

антисипації усі пішоходи є рівноправними і при $\alpha = 1$ може виникнути ситуація, коли два пішоходи, намагаючись пропустити один одного, залишаться нерухомими і будуть заважати руху всього натовпу. Уникнути цього можливо, лише обираючи значення параметра меншими за 1, та кількість таких блокувань можна зменшити через надання одним пішоходам переваг перед іншими. Найефективніший шлях у цьому напрямку — надання переваги більш рухливим пішоходам. Тобто ймовірності зміщення будуть мати наступний запис:

$$P_k \rightarrow P_k \left(1 - \alpha \left(1 - \frac{v}{v_{\max}} \right) P_{k,3} \right). \quad (5)$$

За такої поправки найбільш рухливі учасники ($v = v_{\max}$) нікого не пропускають, однак їх можна зробити більш «ввічливими», якщо підставити в (5) замість v_{\max} дещо більше значення.

Як було наголошено, антисипація залежить від спроможності прогнозувати стан системи. Тому залишається нез'ясованою проблема про методи побудови пішоходами прогнозу, а саме — обчислення ймовірностей $P_{k,3}$. Було розглянуто два варіанти. Перший — прогнозування, що засноване на спостереженнях, яке ґрунтується на гіпотезі про збереження пішоходами напрямку свого руху: «іду, куди дивлюсь, дивлюсь, куди йду». При цьому $P_{k,3}$ можна вважати пропорційною кількості пішоходів, що рухаються («дивляться») в бік k -ї клітини:

$$P_{k,3} = \frac{m}{M}, \quad (6)$$

де m — кількість пішоходів, що прямують в k -у клітину; $M = \langle \text{кількість клітин в околі} \rangle - 1$, у даному випадку $M = 3$.

Цей метод є найпростішим і водночас найменш точним, оскільки прийнятність гіпотези про збереження напрямку руху суттєво залежить від геометричних особливостей конкретної задачі (плану приміщення, тощо). Тому було розглянуто другий метод — прогнозування, яке засноване на моделі пішохода. В цьому випадку кожен учасник руху для кожної клітини зі свого околу обчислює P_k її «сусідів» (крім себе самого). Віднайдена ймовірність має вигляд:

$$P_{k,3} = \sum_{i=1}^3 P_i - \sum_{i \neq j} P_i P_j + \sum_{i \neq j, j \neq k} P_i P_j P_k = \sum_{i=1}^3 P_i - \sum_{i \neq j} P_i P_j + \prod_{i=1}^3 P_i. \quad (7)$$

Ця формула є реалізацією ймовірнісної схеми перебору варіантів потрапляння у клітину одного з трьох «сусідів»: 1-й або (не 1-й та (2-й або (не 2-й та 3-й))). Відповідно, після розкриття дужок утворюється вираз, подібний до (7). Отже, цей підхід забезпечує точніше визначення $P_{k,3}$, хоча є дещо штучним, оскільки для його реалізації кожен учасник руху повинен знати модель поведінки своїх «сусідів», що накладає певні обмеження на гнучкість всієї КА моделі.

З усіма варіантами моделі пішохода, що були описані вище, проведено багато експериментів, результати яких підводять до висновку про адекватність запропонованих підходів. На рис. 3 наведено чотири криві, що

відповідають можливим комбінаціям підходів до запровадження антисипації та методів обчислення прогнозованих значень $P_{k,3}$. Криві перетинаються в точці $\alpha = 0$, оскільки таке значення параметра відповідає простій неантисипаційній моделі.

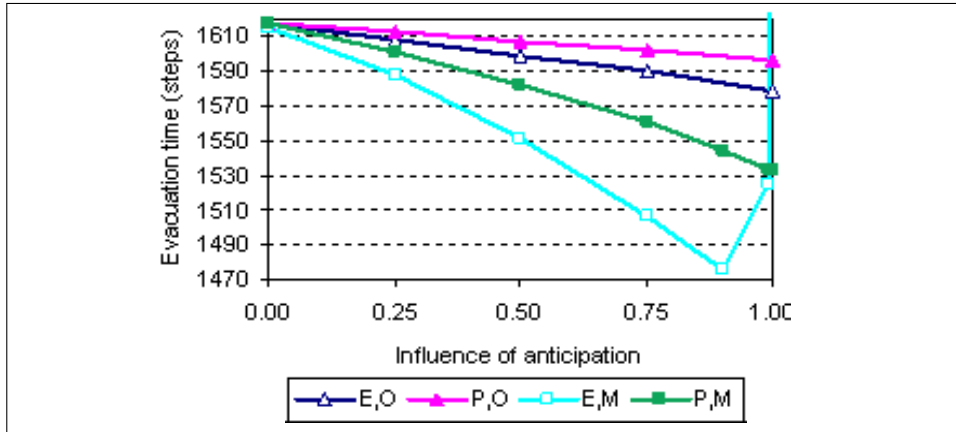


Рис. 3. Результати експериментів (Е/Р — рівноправність/перевага швидких; О/М — передбачення, що базується на спостереженнях/моделі)

Зокрема, наведений графік свідчить, що надання переваги швидким пішоходам призводить до збільшення часу евакуації, тому не є прийнятним. З іншого боку, що точніше розраховуються поправки у P_k (нижня крива на рис. 3), то швидше відбувається евакуація, а це підтверджує адекватність самого підходу до запровадження антисипації у модель. Також нижня крива, що стрімко зростає в околі $\alpha = 1$, демонструє описаний ефект, коли пішоходи, намагаючись пропустити одного, залишаються нерухомими і гальмують рух усього натовпу.

ВИСНОВКИ

Клітинні автомати є потужним засобом моделювання систем із багатьма складовими, зокрема натовпів пішоходів, що рухаються. Перевагою КА підходу є його виняткова ефективність при реалізації (як програмній, так і апаратній), що зумовлена локальністю усіх взаємодій. Таким чином, один крок моделі має лінійну часову складність залежно від розміру системи (кількості пішоходів).

Крім того, такий підхід є достатньо гнучким, бо дозволяє моделювати рух невизначеної кількості пішоходів у середовищі з геометрією довільної складності (будь-якому розташуванні перешкод). При цьому, співвідношення, на які покладена динаміка пішохода, є достатньо простими та інтуїтивно зрозумілими. Водночас простота базових правил переміщення не обмежує здатність моделі відтворювати всі можливі явища.

Але, незважаючи на те, що навіть прості правила дають підстави якісно моделювати практично усі явища, що виникають у реальних натовпах, існує суттєвий розрив між кількісними даними моделі та результатами вимірів показників реальних натовпів пішоходів. Тому є потреба в реалістичніших правилах, що враховують ментальні особливості учасників руху. Вище було

зроблено спробу (як показали результати експериментів — вдалу) запровадити антисипацію у КА модель. Проте, в цьому дослідженні антисипацію було використано досить обмежено тому, що пішохід взяв до уваги інформацію лише про окіл радіуса в дві клітини і робив прогноз тільки на один крок у часі. Отже, у подальшому доцільно залучати універсальніші методи запровадження антисипації у КА моделі, які б дозволили відображати різний ступінь поінформованості пішоходів (наявність у них інформації про окіл довільного радіуса) та висувати прогнози з довільним горизонтом (що призведе до появи багатозначності і дасть змогу реальним чином ввести у модель процеси ухвалення рішень). Також можливе запровадження антисипаційних механізмів у КА моделі інших систем.

Роботу частково профінансовано грантом Ф25/210-2008 ДФФД України.

ЛІТЕРАТУРА

1. Chowdhury D., Santen L., Schadschneider A. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems // *Physics Reports Issues*. — 2000. — **329**, № 4–6. — P. 199–329.
2. Shreckenberg M., Sharma S.D. (eds.) *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. — Berlin: Springer, 2001. — P. 123–154.
3. Helbing D., Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics // *Physical Review*. — 1995. — **51**. — P. 4282–4286.
4. Helbing D., Farkas I.J., Vicsek T. Simulating Dynamical Features of Escape Panic // *Nature*. — 2000. — **407**. — P. 487–490.
5. Wolfram S. *A new kind of science*. — Champaign, IL, USA: Wolfram Media Inc., 2002. — 1280 p.
6. Gilbert N. and Troitzsch K. *Simulation for the social scientist*. — Milton Keynes, UK: Open University press. — 1999. — P. 130–169.
7. Тоффоли Т., Марголюс Н. *Машины клеточных автоматов: Пер. с англ.* — М.: Мир, 1991. — 278 с.
8. Gardner M. The fantastic combinatorics of John Conway's new solitaire game «Life» // *Scientific American*. — 1970. — **223**, № 4. — P. 120–123.
9. Chopard B., Droz M. *Cellular Automata Modeling of Physical Systems*. Cambridge University Press. — 1998. — 341 p.
10. Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic // *Journal de Physique I*. — 1992. — **2**, № 12. — P. 2221–2229.
11. Goldengorin B., Makarenko A., Smilianec N. Some applications and prospects of cellular automata in traffic problems / In: El Yacoubi S., Chopard B., Bandini S. (eds.) *ACRI 2006. LNCS*. — Springer, Heidelberg. — 2006. — **4173**. — P. 532–537.
12. Makarenko A. Anticipating in modeling of large social systems - neuronets with internal structure and multivaluedness // *International Journal of Computing Anticipatory Systems*. — 2002. — **13**. — P. 77–92.
13. Krushinsky D., Makarenko A. Context-dependent Hopfield-like network / *Second International Scientific Conference «Intelligent Decision-Making Systems and Applied Aspects of Information Technologies» (ISDMIT 2006)*. — 2006. — **2**. — P. 229–232.
14. Макаренко А.С. Модели общественных явлений и сценарные подходы в принятии решений // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2003. — № 3. — С. 127–142.

Received 13.11.2008