

УДК 004.94:519.6

**В.В. ЖИХАРЕВИЧ**, канд. фіз.-мат. наук, доц., ЧНУ  
ім. Ю.Федьковича, Чернівці,  
**К.П. ГАЗДЮК**, асистент, ЧФ НТУ "ХПИ", Чернівці

### **АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ СУСІДНІХ ЕЛЕМЕНТІВ МНОЖИНИ РУХОМИХ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ ЗА УМОВ ФІКСОВАНОЇ КІЛЬКОСТІ СУСІДІВ**

Розглянуто основні алгоритми пошуку найближчих сусідів для безсіткових методів моделювання фізичних процесів. На основі проведеної аналогії рухомих частинок із рухомими клітинними автоматами, запропоновано та досліджено новий алгоритм пошуку сусідів за умов їх фіксованої кількості. На прикладах рівномірного та довільного розподілу автоматів проілюстровано запропонований алгоритм. Іл.: 8. Бібліогр.: 9 назв.

**Ключові слова:** безсітковий метод, рухомі клітинні автомати, алгоритм пошуку сусідів.

**Постановка проблеми.** Існує ряд задач, які мають велике прикладне значення для моделювання взаємодії та деформації тіл, протікання рідин, процесів теплопередачі, астрофізики тощо. З ростом продуктивності комп'ютерної техніки все більшої популярності для розв'язку таких задач набувають безсіткові методи [1, 2], які апроксимують рівняння з частинними похідними, ґрунтуючись лише на наборі вузлів, без використання розрахункової сітки. В таких методах обов'язковим є визначення частинок, які взаємодіють між собою, тобто поняття сусідства частинок. Існує ряд алгоритмів визначення сусідства довільної множини дискретних елементів, які відрізняються продуктивністю та об'ємом використовуваних додаткових допоміжних ресурсів. Зазвичай оптимальний вибір того чи іншого алгоритму здійснюється із врахуванням особливостей модельованої системи. Наприклад, при моделюванні процесів пластичної деформації можна одноразово на початковому етапі, згідно заданої схеми сусідства, визначити сусідів для всієї множини автоматів. Цю інформацію можна занести у допоміжний індексний масив, вміст якого буде незмінним впродовж процесу моделювання. Звичайно, наведений приклад є частковим випадком широкого спектру модельованих динамічних систем. При моделюванні довільної системи методом РКА можливі такі зміщення окремих автоматів, при яких вони вийдуть за межі свого сусідства в околицю іншого. В цьому випадку необхідно визначити нових сусідів. Існуючі алгоритми пошуку сусідів передбачають можливість існування довільної

змінної кількості сусідів для різних дискретних елементів. В той же час, очевидно, що в межах будь-якої множини сусідів, можна виділити підмножину, взаємодія із якою є визначальною, а вплив решти елементів є несуттєвим.

**Аналіз літератури.** Найпростішим підходом до пошуку сусідів є повний перебір всеможливих пар частинок, проте при збільшенні кількості частинок в 10 разів затрати часу та ресурсів на пошук сусідів збільшаться у 100 разів, що значною мірою ускладнює обчислювальний процес. При необхідності пошуку лише одного найближчого сусіда зазвичай використовують метод kD-дерева [3], а також окто-дерева [4], у випадку сусідства згідно заданого радіусу взаємодії. Недоліком окто-дерев є їх ієрархічна структура даних, яка моделює ієрархічну структуру процесів. При значній кількості частинок виникає необхідність моделювання протікання паралельних процесів, і пошуку алгоритму для паралельних задач. В [5 – 7] описані методи, які полягають в розбитті області на комірки нерухомою сіткою різної розмірності в залежності від поставлених задач. В останні роки широкого застосування набули клітинні автомати (КА) [8] та рухомі клітинні автомати (РКА) [9], які не мають жорсткої прив'язки до просторової стаціонарної решітки та можуть набувати довільних значень у просторі. Це дозволяє провести чітку аналогію із безсітковими методами моделювання.

**Мета роботи.** В даній роботі пропонується алгоритм пошуку сусідів, заснований на ідеї фіксованої кількості сусідів (аналог фіксованої схеми сусідства для класичних КА).

**Реалізація алгоритму.** Вся множина автоматів нумерується (індексується) і для кожного окремого КА вказуються індекси його сусідів. Далі, на кожному кроці взаємодії, яке передбачає зокрема і зміну координат КА, відбувається порівняння відстаней до "віддалених" сусідів (сусідів вибраного сусіда). Якщо деяка відстань виявиться меншою за "ближній" максимум, то ближнім встановлюється індекс "віддаленого" сусіда.

Кількість сусідів може бути довільною. Якщо автомати, що моделюють деяку систему, не взаємодіють один з одним, то сусідство може бути відсутнє взагалі (нульова кількість). І навпаки, якщо є необхідність організувати взаємодію кожного автомата зі всією множиною одночасно, то кількість сусідів може дорівнювати повній кількості автоматів у системі мінус один. Нехай, для прикладу, кожен автомат має по шість сусідів (рис. 1). На кожному кроці алгоритму обирається зі всієї множини один автомат (замальовано чорним

кольором) та визначається максимальна відстань до його сусідів (позначено пунктирним колом). Далі випадковим чином обирається один із сусідніх автоматів (замальовано сірим кольором із точкою), з яким поперше, може бути організовано взаємодію, а по-друге, використовуючи його як автомат-посередник, відшукуються індекси та координати "віддалених" сусідів (білі автомати, з'єднані із посередником пунктирними лініями).

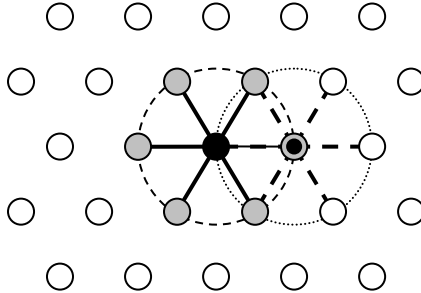


Рис. 1. Схематичне зображення фрагменту множини рухомих клітинних автоматів, де чорним кольором замальовано обраний для взаємодії автомат, сірим – його найближчі сусіди, а сірим із точкою – автомат-посередник для пошуку "віддалених" сусідів

Припустимо, що в системі відбулися деякі зміщення рухомих клітинних автоматів, як показано на рис. 2. В результаті такого зміщення, як видно із рисунку, виявляється, що деякий "віддалений" сусід стає ближчим до обраного автомата у порівнянні із максимально віддаленим "ближнім" сусідом, радіус-вектор до якого описує пунктирне коло. У нашому випадку кількість найближчих сусідів до будь-якого автомата є фіксованою, а отже необхідно замінити індекс максимально віддаленого "ближнього" сусіда на індекс відповідного "віддаленого" сусіда, що потрапляє у межі пунктирного кола. Якщо таких автоматів є декілька, обирається найближчий з них.

Результати роботи описаного алгоритму зображено на рис. 3. Крім того, тут зображено зміну сусідів для автомата-посередника. Звичайно, для цього необхідно, щоб автомат-посередник був обраний для взаємодії автоматом у подальших кроках ітераційного циклу клітинно-автоматних взаємодій. Якщо порівнювати рис. 2 та 3, то можна відмітити зменшення радіус-векторів, що визначають відстань між обраними автоматами та максимально віддаленими найближчими сусідами.

Таким чином, очевидно, що при довільному випадковому визначенні початкового стану допоміжного індексного масиву сусідства, в результаті роботи запропонованого алгоритму через певну кількість кроків ітераційного циклу клітинно-автоматних взаємодій, індексний масив самовільно впорядкується за принципом мінімально можливих відстаней між будь-яким автоматом та його найближчими сусідами.

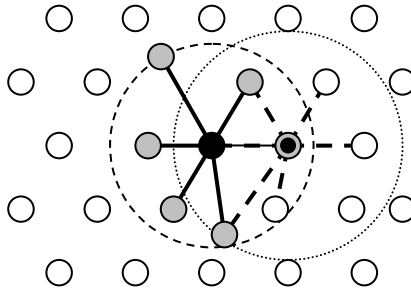


Рис. 2. Схематичне зображення деякого зміщення координат у околі обраного автомата та автомата-посередника

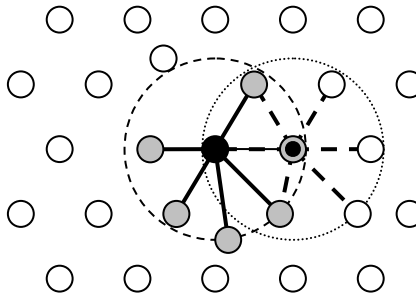


Рис. 3. Схематичне зображення результатів визначення нових сусідів для обраного автомата та автомата-посередника

Продемонструємо це на прикладах. Нехай маємо рівномірний розподіл скінченної кількості рухомих автоматів у деякому обмеженому просторі (рис. 4). Результат роботи запропонованого алгоритму зображено на рис. 5. Видно, що в центральній частині множини автоматів має місце чітке регулярне визначення сусідів, а у граничному шарі – деяке спотворення. На рис. 6, 7 наведено початковий та кінцевий стан зв'язків між сусідами для випадкового розподілу клітинних автоматів у просторі.

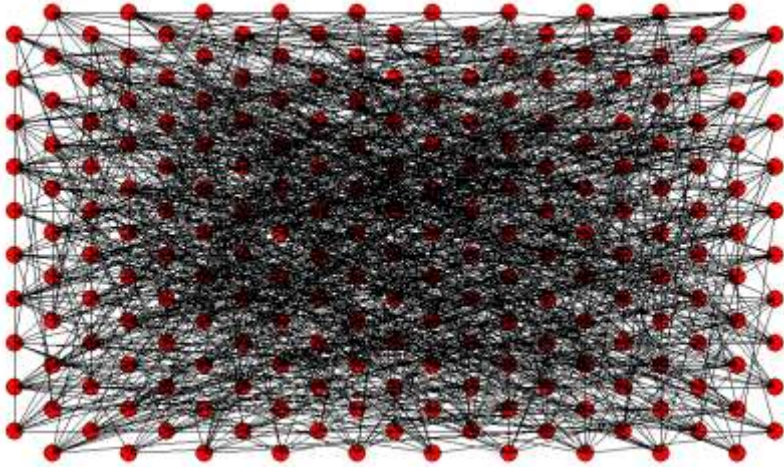


Рис. 4. Приклад випадкового початкового формування зв'язків сусідства для рівномірного розподілу клітинних автоматів у просторі

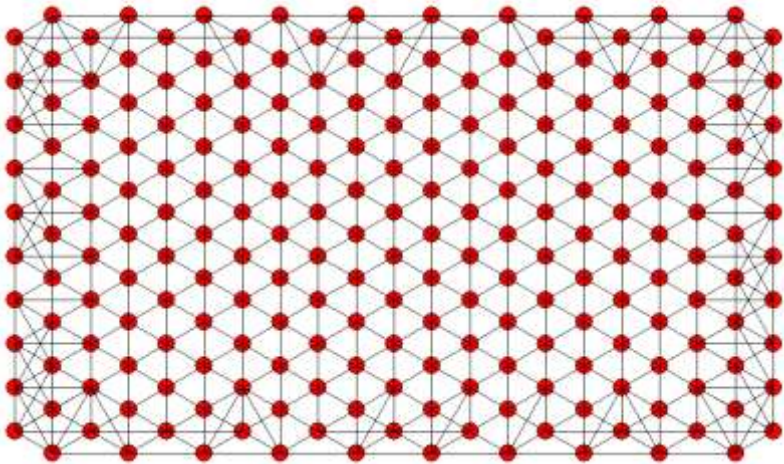


Рис. 5. Результат роботи алгоритму щодо впорядкування індексного масиву сусідства виходячи з критерію мінімальних відстаней до сусідів для рівномірного розподілу клітинних автоматів у просторі

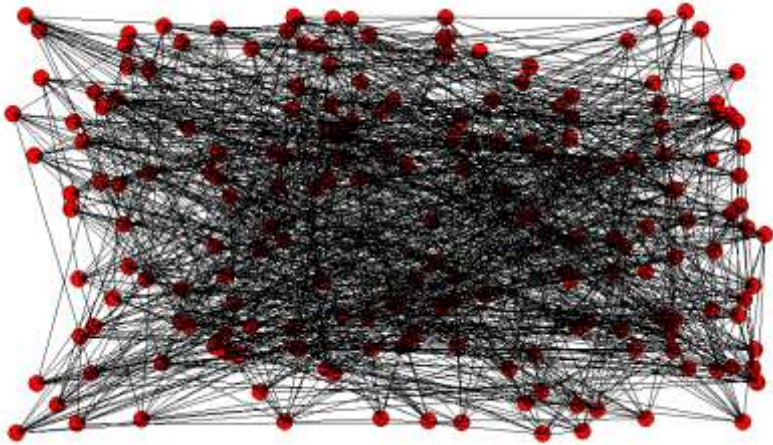


Рис. 6. Приклад випадкового початкового формування зв'язків сусідства для випадкового розподілу клітинних автоматів у просторі

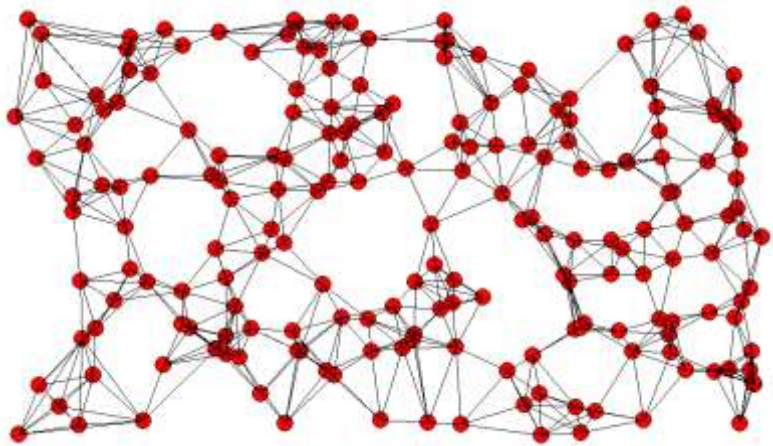


Рис. 7. Результат роботи алгоритму щодо впорядкування індексного масиву сусідства виходячи з критерію мінімальних відстаней до сусідів для випадкового розподілу клітинних автоматів у просторі

Для оцінки даного алгоритму наведемо порівняльні характеристики залежності часу на пошук сусідів від кількості частинок для методу

повного перебору та запропонованого нами (рис. 8). Методи будемо реалізовувати виходячи з критерію мінімальних відстаней до сусідів.

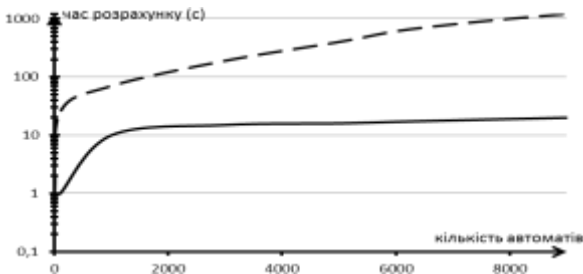


Рис. 8. Залежність часу на пошук сусідів від кількості частинок. Метод повного перебору – пунктирна лінія. Алгоритм щодо впорядкування індексного масиву сусідства – суцільна лінія

Звісно, методи окто-дерев, хеш-таблиць та розглянуті в [5 – 7] також є досить ефективними та значною мірою оптимізують обчислювальний процес, проте одні з них є чутливими до нерівномірності розподілу частинок [7], інші потребують потужних та дорого вартісних програмно-апаратних комплексів. Запропонований нами підхід позбавлений цих недоліків.

**Висновки.** Реалізовано алгоритм пошуку сусідів за умови їх фіксованої кількості шляхом введення допоміжного індексного масиву сусідства. Продемонстровано результати роботи алгоритму щодо впорядкування індексного масиву сусідства виходячи з критерію мінімальних відстаней до сусідів для рівномірного та випадкового розподілу клітинних автоматів у просторі.

**Список літератури:** 1. *Афанасьев К.Е.* Направления научных исследований кафедры ЮНЕСКО по новым информационным технологиям. Часть 2. Бессеточные методы / *К.Е. Афанасьев, С.Н. Карабцев, Р.С. Макаручук, Т.С. Рейн* // Вестник КемГУ. – 2013. – № 3 (55). – Т. 2. – С. 27-55. 2. *Gingold R.A.* Smoothed Particle Hydrodynamics. Theory and Application to Nonspherical Stars / *R.A. Gingold, J.J. Monahan.* – Monthly Notices Royal Astr. Soc., 1977. – 181 p. 3. *Moore A.* An introductory tutorial on kd-trees [Електронний ресурс] / *Andrew W. Moore.* – Режим доступу до ресурсу: <http://www.autonlab.org/autonweb/14665/version/2/part/5/data/moore-tutorial.pdf?branch=main&language=en>. 4. *Потанов А.П.* Численное моделирование высокоскоростных соударений деформируемых тел методом сглаженных частиц: дис. на соискание уч. степени канд. физ.-мат. наук: спец. 05.13.18 "Мат. моделирование, численные методы и комплексы программ" / *Потанов Антон Павлович.* – Москва, 2009. – 107 с. 5. *Хокни Р.* Численное моделирование методом частиц / *Р. Хокни, Дж. Иствуд.* – М.: Мир, 1987. – 638 с. 6. *Каліон В.А.* Використання методу гідромеханіки згладжених частинок для розв'язання задач гідромеханіки доквілля. / *В.А. Каліон, І.О. Бровченко, А.О. Куцан* // Вісник Київського університету. – 2007. – № 4. – С. 77-83. 7. *Афанасьев К.Е.* Алгоритм поиска ближайших соседей в методе сглаженных частиц и его

параллельная реализация / К.Е. Афанасьев, П.С. Макаrchук, А.Ю. Попов. // Журнал "Вычислительные технологии". – 2008. – № 5. – С. 9-13. **8.** Аладьев В.З. Классические однородные структуры. Клеточные автоматы. [Электронный ресурс] / В.З. Аладьев. – 2009. – Режим доступа до ресурсу: <http://elib.grsu.by/katalog/134963-249078.pdf>. **9.** Добрынин С.А. Развитие метода подвижных клеточных автоматов для моделирования генерации и распространения упругих волн при контактном взаимодействии твердых тел: дис. на соискание уч. степени канд. физ.-мат. наук спец. 01.02.04 – "Механика деформируемого твердого тела", 01.04.07 – "Физика конденсированного состояния" [Электронный ресурс] / Сергей Александрович Добрынин. – Томск, 2009. – Режим доступа до ресурсу: [http://serg-dobrinin.narod.ru/disert/1\\_title\\_15-12-2009.pdf](http://serg-dobrinin.narod.ru/disert/1_title_15-12-2009.pdf)

**Bibliography (transliterated):** **1.** Afanas'ev K.E. Napravlenija nauchnyh issledovanij kafedry JuNESKO po novym informacionnym tehnologijam. Chast' 2. Bessetochnye metody / K.E. Afanas'ev, S.N. Karabeev, R.S. Makarchuk, T.S. Rejn // Vestnik KemGU. – 2013. – № 3 (55). – Т. 2. – Р. 27-55. **2.** Gingold R.A. Smoothed Particle Hydrodynamics. Theory and Application to Nonspherical Stars / R.A. Gingold, J.J. Monahan. – Monthly Notices Royal Astr. Soc., 1977. – 181 p. **3.** Moore A. An introductory tutorial on kd-trees [Elektronnij resurs] / Andrew W. Moore. – Rezhim dostupu do resursu: <http://www.autonlab.org/autonweb/14665/version/2/part/5/data/moore-tutorial.pdf?branch=main&language=en>. **4.** Potapov A.P. Chislennoe modelirovanie vysokoskorostnyh soudarenij deformiruemyh tel metodom sglazhennyh chastic: dis. na soiskanie uch. stepeni kand. fiz.-mat. nauk: spec. 05.13.18 "Mat. modelirovanie, chislennye metody i komplekсы программ" / Potapov Anton Pavlovich. – Moskva, 2009. – 107 p. **5.** Hokni R. Chislennoe modelirovanie metodom chastic / R. Hokni, Dzh. Istvud. – М.: Mir, 1987. – 638 p. **6.** Kalion V.A. Vikoristannja metodu gidromehaniki zgladzhennyh chastinok dlja rozv'jazannja zadach gidromehaniki dovkilija. / V.A. Kalion, I.O. Brovchenko, A.O. Kushhan // Visnik Kiivs'kogo universitetu. – 2007. – № 4. – Р. 77-83. **7.** Afanas'ev K.E. Algoritm poiska blizhajshih sosedej v metode sglazhennyh chastic i ego parallel'naja realizacija / K.E. Afanas'ev, R.S. Makarchuk, A.Ju. Popov // Zhurnal "Vychislitel'nye tehnologii". – 2008. – № 5. – Р. 9-13. **8.** Alad'ev V.Z. Klasicheskie odnorodnye struktury. Kletochnye avtomaty. [Elektronnij resurs] / V.Z. Alad'ev. – 2009. – Rezhim dostupu do resursu: <http://elib.grsu.by/katalog/134963-249078.pdf>. **9.** Dobrynin S.A. Razvitie metoda podvizhnyh kletochnyh avtomatov dlja modelirovanija generacii i rasprostranjenija uprugih voln pri kontaktnom vzaimodejstvii tverdyh tel: dis. na soiskanie uch. stepeni kand. fiz.-mat. nauk spec. 01.02.04 – "Механика деформируемого твердого тела", 01.04.07 – "Физика конденсированного состояния" [Elektronnij resurs] / Sergej Aleksandrovich Dobrynin. – Tomsk, 2009. – Rezhim dostupu do resursu: [http://serg-dobrinin.narod.ru/disert/1\\_title\\_15-12-2009.pdf](http://serg-dobrinin.narod.ru/disert/1_title_15-12-2009.pdf)

Надійшла (received) 10.08.2015

Статью представил д.т.н., проф. НТУ "ХПИ" Поворознюк А.И.

Zhikharevich Vladimir, PhD, Math-ph  
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University  
Str. Universytetska 28, Chernivtsi, Ukraine, 58012  
tel./phone: (050) 254-21-73, e-mail: vzhikhar@mail.ru  
ORCID ID: 0000-0003-4882-2954

Gazdyuk Kateryna, master  
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University  
Str. Universytetska 28, Chernivtsi, Ukraine, 58012  
tel./phone: (066) 491-47-42, e-mail: kateryna.gazdyuk@gmail.com