

О. В. Мельник, канд. техн. наук

ПРОМЕНЕВИЙ АЛГОРИТМ ПОШУКУ ШЛЯХУ НА ГЕКСАГОНАЛЬНОМУ РАСТРІ

В статті розглянуто променевий алгоритм пошуку шляху, який в теорії графів застосовується для пошуку шляху між вершинами зв'язного графу. На практиці він використовується для вирішення цілого ряду прикладних задач. Застосовуючи променевий алгоритм пошуку шляху знаходять та будують маршрути від початкової точки до місця призначення у картах та навігаторах на місцевості, при проєктуванні електронних плат мікроконтролерів, в логістиці, картографії, комп'ютерних іграх. Використання штучного інтелекту у безпілотних транспортних засобах актуалізувало застосування променевого алгоритму пошуку шляху, як швидкий і маловитратний спосіб побудови маршрутів в режимі реального часу і в ситуації динамічних змін поточних сценаріїв руху. Особливостями променевого алгоритму пошуку шляху є направлений пошук вздовж вибраних променів, рух променів з обох вершин у напрямку один до одного, побудова шляху від вершини перетину взаємонаправлених променів. Запропоновано застосувати променевий алгоритм пошуку шляху для гексагональних комірок. Характерною особливістю гексагональних комірок є їх шестизв'язна симетрія та найнижче співвідношення периметра до площі серед інших багатокутників (і квадрата в тому числі). Застосовуючи променевий алгоритм пошуку шляху на гексагональних комірках буде збільшено можливі напрямки поширення променю з 4-х до 6-ти. Дослідження поля гексагональних комірок здійснюється у напрямку руху променю, залежно від початкових передумов, що визначаються різницею координат початкової комірки і комірки призначення, до якої має бути прокладено шлях. Оскільки під час аналізу координат комірок вибираються і аналізуються координати не всіх комірок, а тільки ті, що розміщені на шляху променю, променевий алгоритм пошуку шляху матиме кращу швидкодію під час реалізації, ніж хвильовий алгоритм. Недоліком променевого алгоритму пошуку шляху є те, що не завжди можна знайти шлях між визначеними комірками, хоча варіанти шляху можуть існувати. Також запропоновано представлення поля гексагональних комірок у виді зв'язного графу та перетворення у двовимірну матрицю, для кращої обробки програмними засобами, та для виявлення непрохідних комірок, якщо такі присутні.

Ключові слова: променевий алгоритм пошуку, алгоритм Абрайтіса, гексагональний растр, гексагональна комірка, гексагональна топологія, зв'язний граф, двовимірна матриця.

Вступ

Променевий алгоритм пошуку (або Променевий алгоритм, або алгоритм Абрайтіса) в інформатиці та теорії графів визначається як алгоритм евристичного дослідження графу для визначення шляху між двома вершинами графу. В променевому алгоритмі використовується пошук в ширину для побудови дерева пошуку.

На кожному рівні дерева променевий алгоритм генерує наступні стани на поточному рівні, сортує їх у порядку зростання евристичної ваги. Ширина променю в алгоритмі пошуку шляху залежить від обчислювальної потужності, ресурсів пам'яті та задається на старті алгоритму.

Дослідження поля комірок для побудови шляху між комірками А та В здійснюється за завчасно визначеними напрямками руху, які і є променями, що вказують поширення кроків для побудови шляху.

Таким чином, досягається зменшення часу для побудови шляху, оскільки шлях прокладається без проведення аналізу всіх вільних комірок, а, тільки тих, що знаходяться на вершині променю руху(рис. 1).

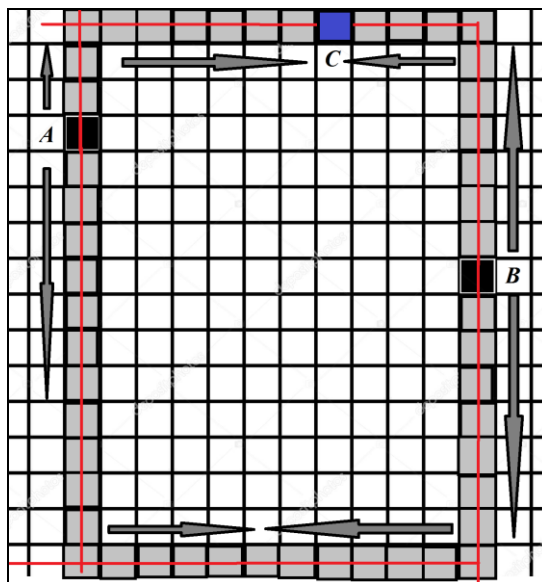


Рис. 1. Знаходження шляху між комірками А та В

Промені задають поширення кроків одночасно з обох точок А і В, таким чином шлях будуватиметься до перетину променів в точці С, або до тупику, якщо шлях між точками А і В неможливий.

Метою статті є розглянути можливість застосування променевого алгоритму пошуку шляху на полі гексагональних комірок (на гексагональному растрі), а також особливості використання пов'язані з властивостями гексагональних структур.

Практичне застосування променевого алгоритму пошуку шляху

Променевий алгоритм пошуку шляху вирішує задачу знаходження шляху від початкової точки до місця призначення. Стратегії пошуку шляху зазвичай використовуються як основа для будь-якої системи руху – в логістиці, картографії, комп'ютерних іграх, топологічних задачах та при проектуванні електронних плат мікроконтролерів.

В комп'ютерних іграх пошук шляху є предметом досліджень протягом багатьох років (рис. 2). Це одна з найбільш популярних та складних задач в комп'ютерній ігровій індустрії [1, 2]. Задачу пошуку шляху в комп'ютерних іграх необхідно вирішувати в режимі реального часу, при чому за умови обмеженого доступу до пам'яті та ресурсів процесора. Саме тому пошук шляху на великих ігрових картах створює так звані «вузькі місця» в швидкодії, графічному відображенні та продуктивності [2 – 4].

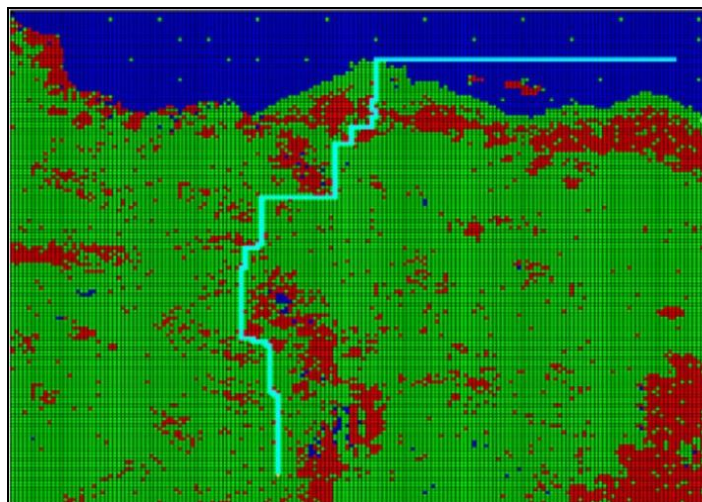


Рис. 2. Результат знаходження шляху на ігровій карті [2]

Променевий алгоритм пошуку шляху використовується для знаходження шляху між початковим та кінцевим місцем призначення на площині, що представляє собою карту або лабіринт. Ігрові карти в комп'ютерних іграх це лабіринти, в яких має бути прокладено маршрути в залежності від положення початкової точки в кожен момент в режимі реального часу (рис. 3).

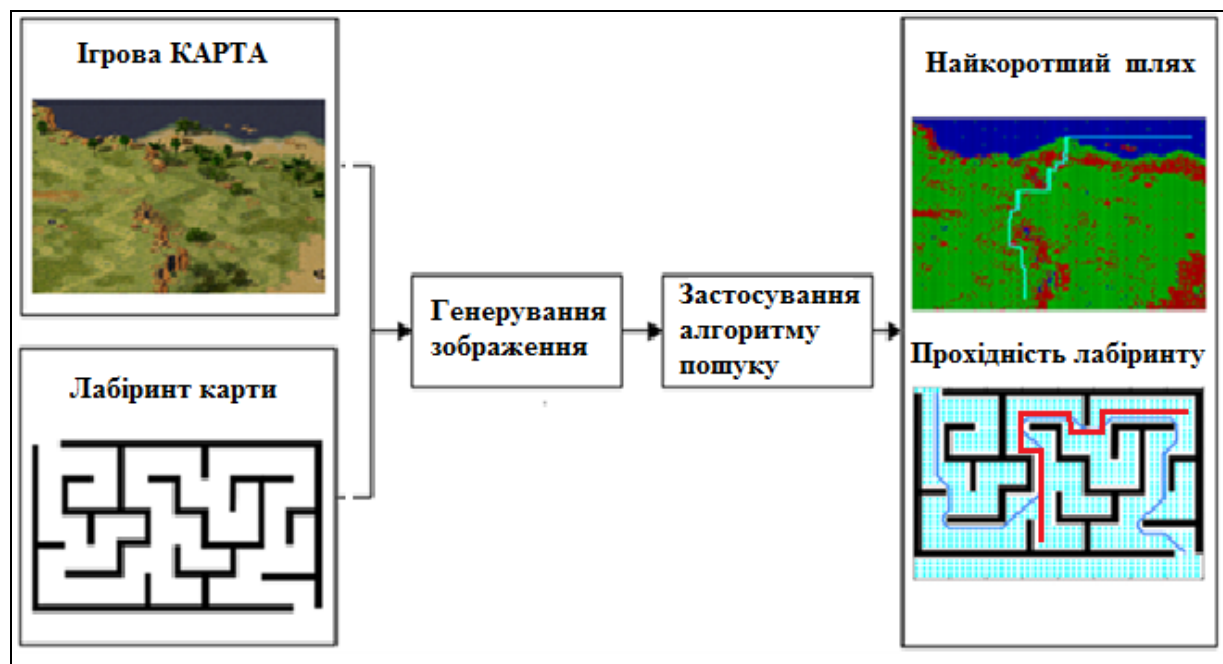


Рис. 3. Представлення ігрової карти у виді лабіринту [2]

Пошук шляху в лабіринті – це задача, яка може приймати різні форми. Знаходження шляху від початкової точки до точки призначення може мати ряд різних рішень, та мають бути задоволені наступні умови – запропоновано спосіб дістатися від початкової точки до точки призначення; запропоновано спосіб обійти перешкоди на шляху; запропоновано спосіб знайти найкоротший можливий шлях; запропоновано спосіб якнайшвидше знайти шлях.

Інший великий клас задач, які сьогодні вирішуються із застосуванням променевого алгоритму пошуку шляху – це створення карт використовуваних автономними транспортними засобами, які функціонують без водія людини [5].

Кarti, що використовуються автономними транспортними засобами із застосуванням штучного інтелекту, повинні не лише фіксувати розташування, геометрію та атрибути елементів навколишнього середовища, але й відображати їхній просторовий розподіл, взаємодію, асоціації та зміни, що відбуваються в конкретний момент часу.

Методи побудови і динамічної трансформації карт, поточні сценарії яких включають нечіткі зв'язки графів дорожньої сцени, застосовують для прогнозування різних сценаріїв руху променевого алгоритму пошуку шляху [5].

Застосування променевого алгоритму на гексагональних комірках

Гексагональна топологія має свої особливості, пов'язані з геометрією гексагона, який, на відміну від квадрата, зв'язаний з шістьма сусідніми гексагонами спільними ребрами [6]. Під час застосування променевого алгоритму пошуку шляху на гексагональних комірках, рух променя можливий за шістьма рівнозначними напрямками кратними кутам 60° (рис. 4).

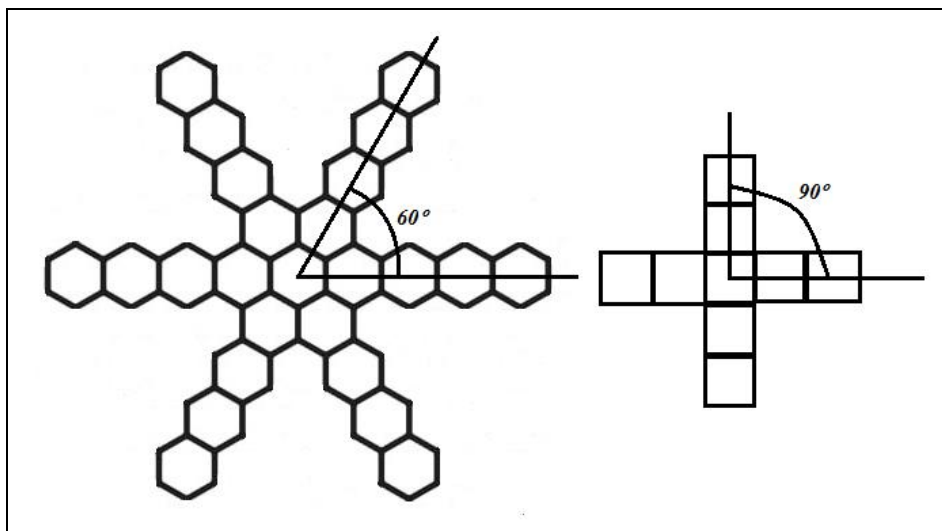


Рис. 4. Направленість руху у променевому алгоритмі пошуку шляху

Гексагональні комірки відрізняються найнижчим співвідношенням периметра до площі серед усіх інших плоских структур [7], тому це призводить до мінімізації ефекту спотворення країв під час роботи з гексагональними комірками. Кожен одиничний структурний елемент у шестикутній сітці має шість ідентичних сусідніх клітин, відстань між центрами яких є однаковою для всіх сусідів [8]. Таким чином можливі напрямки поширення променя зростають від 4 в прямокутних комірках до 6 на гексагональних комірках [6].

Застосуємо комбінаторне правило перестановки можливих варіантів $P_n = n!$. Кількість способів знайти шлях від комірки А до комірки В для прямокутних комірок ($n=4$) $P_n = n! = 4! = 24$; а для гексагональних комірок ($n=6$) $P_n = n! = 6! = 720$. Збільшення варіативності способів знаходження шляху між двома комірками значно збільшує швидкість і покращує імовірність, у випадку якщо шлях існує і задача має розв'язок.

Променевий алгоритм пошуку шляху для гексагональних комірок аналогічний традиційному. Дослідження поля комірок для побудови шляху між комірками А та В здійснюється за завчасно визначеними напрямками руху, які і є променями, що вказують поширення кроків для побудови шляху. Якщо для комірок А і В задовольняється умова $(X_B - X_A) > 0$; $(Y_A - Y_B) > 0$; то напрям променів для поширення кроків

Промені задають поширення кроків одночасно з обох комірок А і В, таким чином шлях будується до перетину променів в комірниці С (рис. 5).

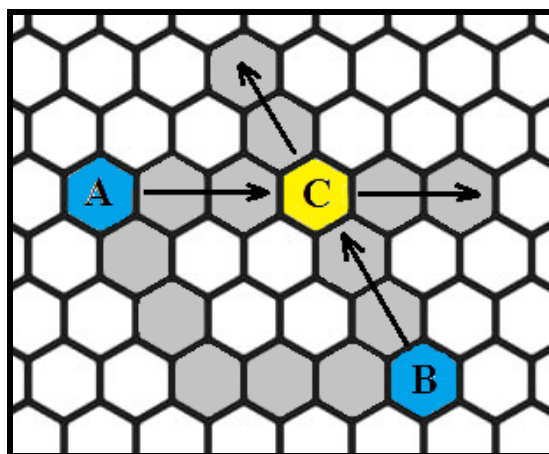


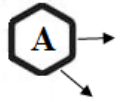
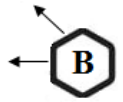
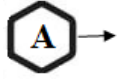
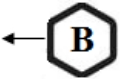
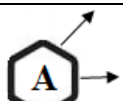
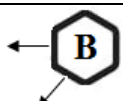
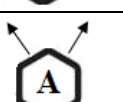
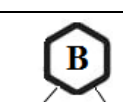
Рис. 5. Знаходження шляху між А та В для гексагональних комірок

В таблиці 1 наведено варіанти напрямків променів для поширення кроків залежно від позиції комірок А і В на полі комірок. Залежно від передумов, що визначаються різницею координат комірок А і В, може бути обрано напрям, за яким можна проводити поширення променя і знаходження шляху між комірками А і В. За обраними напрямками проводиться покроковий рух комірками з кожним кроком наближаючись до випадку, коли передумова не буде виконуватись. Таким чином буде знайдено комірку С перетину двох взаємонаправлених променів, з якої прокладається шлях між комірками А і В.

Коли під час виконання чергового кроку алгоритму, на шляху виникнуть непрохідні комірки і комірку перетину не буде досягнуто, потрібно проаналізувати точки в яких не виконалась передумова і змінити напрям променів. Якщо і у випадку зміни напрямку променів сусідні комірки, через які спрямований промінь, теж будуть непрохідні, то шлях між комірками А і В прокласти неможливо.

Таблиця 1

Напрямки поширення кроків у променевому алгоритмі

Передумова	Напрямки променів	
$(X_B - X_A) > 0;$ $(Y_A - Y_B) > 0;$		
$(X_B - X_A) > 0;$ $(Y_A - Y_B) = 0;$		
$(X_B - X_A) > 0;$ $(Y_B - Y_A) > 0;$		
$(X_B - X_A) = 0;$ $(Y_A - Y_B) > 0;$		

Перевагою променевого алгоритму пошуку шляху на гексагональних комірках (як і на квадратних комірках) є висока швидкодія. Це завдяки тому, що під час аналізу координат комірок вибираються тільки ті, що розміщені на шляху променя, а не всі, як, наприклад, у хвильовому алгоритмі. Недоліком є те, що алгоритм не завжди може віднайти шлях між комірками, хоча шлях може існувати.

Поле гексагональних комірок, на якому реалізовано променевий алгоритм пошуку шляху можна представити у вигляді зв'язного графу та задати у формі двовимірної матриці (рис. 6).

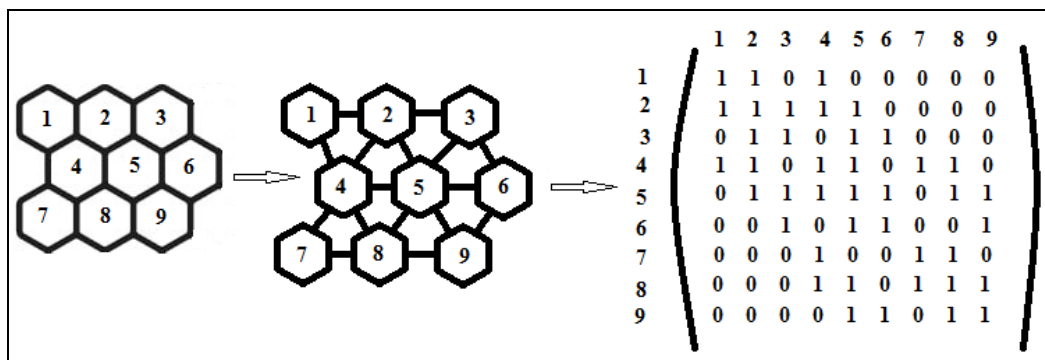


Рис. 6. Представлення зв'язного графу у виді матриці

Цифра “1” у матриці позначає наявність шляху між комірками, а “0” – відсутність шляху. Використовуючи двовимірну матрицю можна визначити наявність шляху між визначеними вершинами зв'язного графа. Наприклад, щоб визначити наявність шляху між вершинами 1 та 9, що зображені на рис. 6 достатньо виконати два кроки (рис. 7).

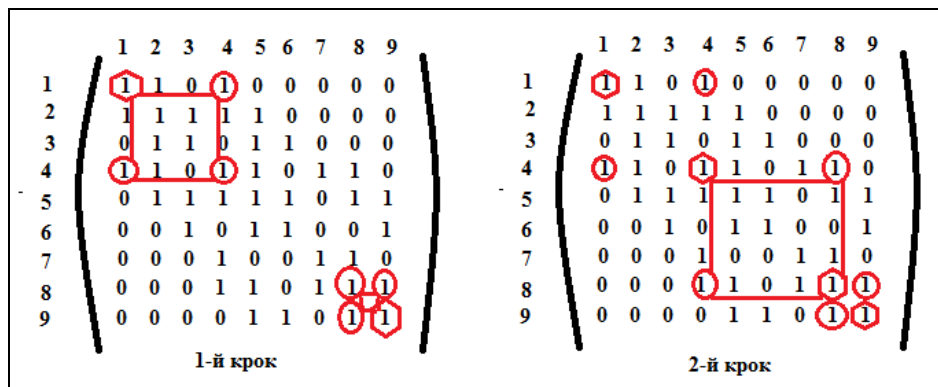


Рис. 7. Визначення шляху між комірками на двовимірній матриці

На першому кроці з обох комірок, які розташовані на промені руху за променевим алгоритмом визначається можливий шлях в зустрічному напрямку і комірки, які найближчі на цьому шляху. На другому кроці повторюється така ж процедура в якій початковими комірками виступають ті, що визначені на першому кроці. Оскільки другий крок призвів до знаходження прямого зв'язку між комірками призначення, шлях між комірками (вершинами зв'язного графу) 1 та 9 знайдено.

Такий спосіб застосування променевого алгоритму пошуку шляху зручний та оптимальний для комп'ютерної обробки і обчислень програмними засобами.

Висновки

Запропоновано застосування променевого алгоритму пошуку шляху на гексагональних комірках (гексагональному растрі). Розглянуто особливості алгоритму, які полягають у збільшенні кількості можливих напрямків руху променів з 4-х до 6-ти, і таким чином збільшенні варіативності побудови шляху між комірками початку та призначення.

Запропоновано представляти поле гексагональних комірок у виді зв'язного графу та задавати двовимірною матрицею, що є зручним для обробки і обчислень програмними засобами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Barnouti N., Al-Dabbagh S., Sahib Naser M. Pathfinding in Strategy Games and Maze Solving Using A* Search Algorithm. *Journal of Computer and Communications*. September 2016. Vol. 4, №11. P. 15–25. DOI: 10.4236/jcc.2016.411002.
2. An Optimized Hybrid Approach for Path Finding / A. Ansari et al. *International Journal in Foundations of Computer Science & Technology (IJFCST)*. March 2015. Vol. 5, №2. P. 47–58. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1504/1504.02281.pdf>.
3. Gordon V. S., Matley Z. Evolving Sparse Direction Maps for Maze Pathfinding. *Congress on Evolutionary Computation, 2004*. 2004. Vol. 1. P. 835–838. <http://dx.doi.org/10.1109/cec.2004.1330947>.
4. Algfoor Z. A., Sunar M. S., Kolivand H. A Comprehensive Study on Pathfinding Techniques for Robotics and Video Games. *International Journal of Computer Games Technology*. 2015. Article ID: 736138. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/736138>.
5. Road scene map for autonomous driving and modeling method / Juan Lei et al. *International Journal of Digital Earth*. May 2025. Vol. 18, №1. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17538947.2025.2505623>. DOI: 10.1080/17538947.2025.2505623.
6. Мельник О. В., Романюк О. Н. Методи та засоби формування графічних примітивів на гексагональному растрі: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2024. 144 с.
7. Melnik O., Romanyuk O., Savratsky V. Applying of hexagonal raster in image formation. Monography, Boston, USA, 2020. 120 p.
8. Мельник О. В., Романюк О. Н., Відхилення від ідеального відрізка прямої на квадратному та на гексагональному растрі. *Наукові горизонти XXI століття: мультидисциплінарні дослідження: матеріали Міжнародної наукової конференції, м. Ужгород, (16-17 травня 2024 р.)*. Ужгород; Київ, 2024. С. 610–612. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/43244/159243.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.

Стаття надійшла до редакції 17.11.2025.

Стаття пройшла рецензування 12.12.2025.

Мельник Олександр Васильович – канд. техн. наук, доцент кафедри програмного забезпечення, e-mail: vinncei@gmail.com, Scopus Author ID: 56825444100 ORCID ID: 0009-0002-9686-2838 ORCID record is <https://orcid.org/0009-0002-9686-2838>.

Вінницький національний технічний університет.