

Дзюба В. В.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ.

КОЛАПС ХВИЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ КОЛАПСУВАННЯ В ГЕНЕРАЦІЇ ІГРОВОГО ПРОСТОРУ

Анотація: *В статті розглянутий метод створення ігрового контенту за допомогою процедурної генерації на базі колапсу хвильової функції. Визначено, що використання цього методу при використанні базового методу дає відносно прийнятні результати. В деяких випадках зустрічаються аномалії, або генеруються простори з низьким рівнем різноманіття.*

На перших етапах генерації виявлені зони, в яких генерація неможлива при використанні базового методу. Одним з способів вирішення цього питання є повторна генерація, яка потребує додаткових ресурсів.

Запропоновано модифікацію методу з використання повторних проходів. В деяких випадках цей спосіб показав себе досить ефективно. З метою покращення швидкодії методу було запропоноване розбиття простору на зони, для перевірки коректності згенерованої області.

Визначено найефективніше застосування базового методу – проходження простору іншим алгоритмом та постобробка після завершення генерації. Один з таких алгоритмів дозволяє підготувати семпли, що будуть підставлені в замкнуті зони, що з'являються. Попередня підготовка матеріалів генерації дозволяє значно пришвидшити роботу колапсу хвильової функції. Попереднє проходження по простору з метою визначення ймовірних проблемних зон відбувається окремо від основної генерації.

Модифіковано алгоритм для автоматичного розпізнавання сумісних семпли, що значно знижує час на підготовку генерації та кількість створених проблемних ділянок.

Виявлено замкнені простори, які обмежують доступ до частини карти. В залежності від розміру обмеженої ділянки запропоновано кілька варіантів рішення. Для малих ділянок – заміна на декоративний контент, для великих ділянок - регенерація з семплами, що мають створювати внутрішнє наповнення, або заміна деяких блоків на прохідні.

За результатами дослідження зроблено висновок, що генерація ігрового простору методом колапсу хвильової функції має більшу ефективність при використанні допоміжних алгоритмів та обмежень, які задаються на початковому та кінцевому етапі генерації. Також запропонована ідея розбити генерацію на видиму та невидиму частину: видима частина – створюється на етапі підготовки сцени, невидима – під час проходження по рівню.

Ключові слова: *процедурна генерація, колапс хвильової функції, алгоритм, штучний інтелект, оптимізація, семпли, обмеження, ефективність, ігровий простір.*

Dziuba V. V.

State University of Information and Communication Technologies, Kyiv

WAVE FUNCTION COLLAPSE. APPLICATION OF COLLAPSE METHOD IN GAME SPACE GENERATION

Abstract: *The article explores a method for creating game content using procedural generation based on the wave function collapse. It has been determined that using this method with the basic approach yields relatively acceptable results. In some cases, anomalies are encountered, or spaces with a low level of diversity are generated.*

At the initial stages of generation, zones where generation is impossible using the basic method have been identified. One way to address this issue is through repeated generation, which requires additional resources.

A modification of the method has been proposed using repeated passes. In some cases, this method has proven to be quite effective. To improve the method's efficiency, the space has been divided into zones to verify the correctness of the generated area.

The most effective application of the basic method has been determined – traversing the space with another algorithm and post-processing after generation. One such algorithm allows for the preparation of samples to be substituted into closed zones that appear. Preparing generation materials significantly speeds up the operation of the wave function collapse. Preliminary traversal of space to identify probable problem areas occurs separately from the main generation.

The algorithm has been modified for the automatic recognition of compatible samples, significantly reducing the time for generation preparation and the number of problem areas created.

Enclosed spaces that restrict access to parts of the map have been identified. Depending on the size of the restricted area, several solutions have been proposed. For small areas, replacement with decorative content, for large areas – regeneration with samples designed to create internal content, or replacement of certain blocks with passable ones.

Based on the research results, it is concluded that the generation of game space using the wave function collapse method is more efficient when auxiliary algorithms and constraints are applied at the initial and final stages of generation. Also, the idea of dividing generation into visible and invisible parts is proposed: the visible part is created during scene preparation, and the invisible part is generated during level traversal.

Keywords: *procedural generation, wave function collapse, algorithm, artificial intelligence, optimization, samples, constraints, efficiency, game space.*

Вступ

З роками розробка та застосування цифровий ігрових додатків стає все більш популярною, і разом з цим сфери машинного навчання та штучного інтелекту стрімко розвиваються. Важливо відзначити, що попит на високу якість розробки та ефективність роботи команди зростає швидше, ніж сама індустрія. Тому розробники ігрових застосунків постійно досліджують новини в багатьох галузях ІТ-технологій. Штучний інтелект та машинне навчання, безперечно, перебувають під уважним контролем передових фахівців. При створенні ігор ці підходи часто використовуються, але для їх успішного застосування необхідні значні ресурси.

Щодо використання колапсу хвильової функції, ця концепція може бути застосована в розробці ігор для створення складних фізичних просторів, ілюзій та ефектів з економним використанням ресурсів. Наприклад, використовуючи принципи колапсу хвильової функції, можна надати можливість розробникам маніпулювати об'єктами в грі або створювати унікальні інтерактивні сценарії, та простори що реагують на їх дії, та кожного разу перебудовуються по новому. Це значно полегшує розробку і дозволяє позбутися проблеми створення різноманітних рівнів одного типу. [5]

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Ігрова індустрія вже давно переступила рамки розваг та перетворилася на галузь, яка поєднує в собі багато суміжних наук, таких як фізика, математика, часом навіть хімія та біологія. З підвищенням вимог до графіки, швидкодії, штучного інтелекту (ШІ) та геймплею ігрова розробка стала більш складною та вимагає великого обсягу ресурсів.

Штучний інтелект відіграє ключову роль у вдосконаленні ігрового процесу. Алгоритми штучного інтелекту використовуються для створення реалістичних поведінок NPC (персонажів, контрольованих комп'ютером), оптимізації фізичних процесів гри, а також для вирішення завдань, які можуть впливати на поведінку оточення.

Принципи колапсу хвильової функції базуються на квантовій механіці, і вони можуть бути успішно використані в ігровій розробці для полегшення вирішення багатьох перерахованих завдань. Наприклад, за допомогою принципів колапсу хвильової функції можна генерувати зображення, 2D та 3D простори, і навіть вірші, які можуть бути застосовані в сценарію гри.

Однак існують проблеми, пов'язані із застосуванням методу колапсу хвильової функції в ігровій розробці. Вони включають в себе оптимізацію процесу генерації рівнів, забезпечення високої якості геймплею та реалістичності оточуючого світу, а також способи комбінування цього методу з іншими алгоритмами генерації рівнів.

Ця стаття спрямована на застосування цього методу в створенні контенту для при розробці ігор та вирішення проблем, які виникають під час процесу генерації; надає огляд сучасних підходів до використання колапсу хвильової функції в ігровій розробці, а також вказує напрямки подальших досліджень, удосконалень, розвитку цього методу.

Мета і задачі дослідження

З метою визначення напрямків оптимізації створення ігрового простору доцільно розглянути модель колапсу хвильової функції, що застосовується в квантовій механіці та застосувати її в процедурній генерації.

Задачі дослідження це:

- виявити та проаналізувати проекти, що мають згенерований контент;
- визначити ефективність застосування моделі колапсування для створення ігрового контенту в тому числі простору та наповнення;
- дослідити ймовірні проблеми застосування такого методу;
- вирішити виявлені проблеми, модифікувати метод;
- запропонувати варіанти покращення швидкодії генерації з використання процесу колапсування.

Основна частина

Вимоги до якості розробки та швидкості роботи команди зростають швидше ніж розвивається індустрія. Тому розробники ігрових застосунків постійно досліджують новини в багатьох сферах ІТ-технологій. Штучний інтелект та машинне навчання, безперечно, під пильним наглядом передових спеціалістів. При створенні ігор часто застосовуються саме ці підходи, однак на них потрібні великі ресурси.

Штучний інтелект – організована сукупність інформаційних технологій, із застосуванням якої можливо виконувати складні комплексні завдання шляхом використання

системи наукових методів досліджень і алгоритмів обробки інформації, отриманої або самостійно створеної під час роботи, а також створювати та використовувати власні бази знань, моделі прийняття рішень, алгоритми роботи з інформацією та визначати способи досягнення поставлених завдань [1].

Використання штучного інтелекту не завжди є доцільним, оскільки виникає багато суміжних проблем: пошук кваліфікованих спеціалістів; затрати часу і бюджету на побудову, налаштування, навчання створеної моделі; тестування, налаштування та калібрування моделі. Часто розробка якісної моделі штучного інтелекту є довготривалим процесом і доцільна для великих проектів, з якими працюють великі команди розробників, які мають гарне фінансування, в таких випадках доцільно найняти окрему команду для вирішення цього питання. Тому використання такого підходу більше підходить великим проектам, які можуть собі дозволити вирішення описаних вище проблем таких компаній меншості [7].

Зважаючи на вище сказане - прості і швидкі рішення дають відносно велику ефективність з витратою значно менших ресурсів, тому часто стають в нагоді з ціллю пришвидшити та частково автоматизувати процес розробки. Таких рішень є доволі багато і вони мають свої переваги та недоліки. В загальному випадку такі підходи об'єднані в групу під назвою — процедурне генерування вмісту.

Процедурне генерування вмісту (PCG) – це використання формального алгоритму для створення ігрового вмісту, який зазвичай створювався б людиною. Останні роки були присвячені дослідженню методів створення різноманітного вмісту таким способом: рівні, зброю, текстури, процедурні ефекти, а також сюжетне наповнення. Методи для створення такого вмісту варіюються від відносно простих систем, що побудовані на одному правилі, до процесів з великою кількістю пошукових операцій. Зазвичай процедурну генерацію використовують з метою покращення досвіду гравця від повторного проходження гри, зменшення витрат на продукування нового контенту та створення більш адаптивного та персоналізованого контенту [2].

Цікавим рішенням для ігор є алгоритми, спрямовані на генерації мапи, однак жоден з них неможливо вважати універсальним рішенням, тому більшість розробників модифікують обрані ними алгоритми під свої потреби.

Одним із простих методів подібного до броунівського руху є алгоритм випадкового блукання (п'яного блукання). Випадкове блукання (Drunkard walk) відноситься до так званого математичного формалізму. Цей алгоритм дозволяє створювати дуже різноманітні відкриті та закриті простори за рахунок високого рівня випадковості [6].

Його основне призначення - опис траєкторії, що утворюється в результаті виконання послідовних випадкових кроків. Час від часу виникають цікаві випадкові блукання різного роду. Найчастіше розглядаються випадкові блукання, котрі мають в основі ланцюг Маркова, проте становлять інтерес також і інші складніші типи блукань [8].

Цей алгоритм має право на існування однак, за допомогою нього зазвичай створюють простір в двовимірному світі для зовсім простих ігор, таких як наприклад лабіринти. Для більш різноманітних і великих рівнів необхідний інший алгоритм, до того ж такий, який можна було б використовувати в тривимірному просторі. Цікавим кандидатом на цю роль є алгоритм, що базується на колапсі хвильової функції.

Колапс хвильової функції (Wave Function Collapse) – це алгоритм, натхненний ідеями квантової механіки. Відповідно до однієї з таких ідей, для кожного об'єкта існує безліч можливих станів. Таким об'єктом може бути – мапа ігрового рівня. Спочатку мапа має деякий узагальнений невизначений стан, представлений у вигляді всіх можливих комбінацій всіх елементів рівня. Однак під впливом навколишнього середовища - ініціації функції колапсу у випадку з генерацією рівня в грі, об'єкт – мапа, набуває одного з можливих станів [3].

Цей алгоритм в базовому своєму вигляді вже дає хороші результати генерації рівнів, хоча не позбавлений недоліків. Також він доволі простий в реалізації і має простір, для модифікацій. Він не надто простий, щоб обмежуватись лише одним застосуванням і не надто

складний, щоб його модифікувати без значних втрат продуктивності та значних вкладень різного роду ресурсів.

Рішення для генерації рівнів можна побудувати на базі існуючого алгоритму колапсу хвильової функції. Необхідно дослідити її недоліки, ймовірні артефакти генератора, можливості для розширення та модифікації цього способу побудови мап. Позбутися виявлених проблем та модифікувати існуючий алгоритм з метою покращення результатів його роботи без значних втрат швидкодії, та без значного ускладнення самого алгоритму.

Шляхом аналізу існуючих IT-решень та їх моделей було виявлено кілька прикладів що використовують порцедурну генерацію:

- Bad North — мінімалістична гра в режимі реального часу, яка містить серію процедурно згенерованих островів (рис.1).
- Tessera Procedural Tile Based Generator – пакет в магазині активів Unity, розроблений для побудови власних генераторів (рис.2).
- Caves of Qud - 2D-гра в якій кожен прохід застосовує дедалі точніші рівні деталізації. Ранні проходи формують грубу архітектурну структуру. Середні зони заповнюють деталі за допомогою Wave Function Collapse (рис.3).

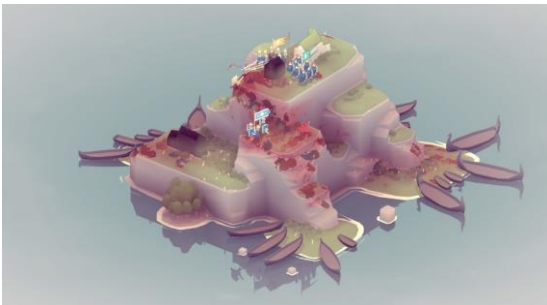


Рис. 1 Bad North

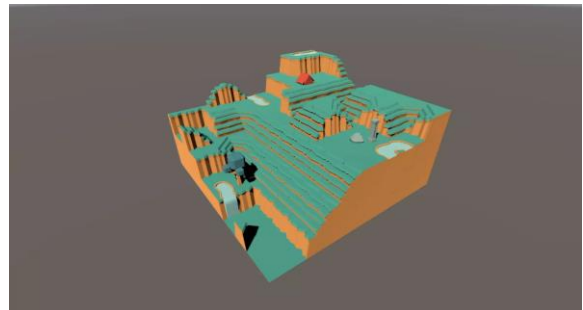


Рис. 2 Tessera Procedure Tile Based Generator



Рис. 3 Caves of Qud

Математичною основою є хвильова функція - будь-яка квадратично-інтегрована функція, яка до колапсу пов'язана з щільністю ймовірності квантової системи. Цю функцію можна виразити як лінійну комбінацію власних станів будь-якого з етапів спостереження [3].

Етапи колапсу хвильової функції:

- етап спостереження представляють собою ініціалізацію динамічних змінних;
- після етапу спостереження, хвильова функція проектується на випадковий власний стан цього етапу спостереження;
- одночасно з попереднім етапом спостереження вимірюється значення наступного етапу спостереження як власне значення кінцевого стану системи;

За основу береться квадратично-інтегрована функція:

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C} \text{ square integrable} \iff \int_{-\infty}^{\infty} |f(x)|^2 dx < \infty$$

Можна також говорити про квадратичну інтегровність на обмежених інтервалах, для таких $[a, b]$, що $a \leq b$:

Квантовий стан системи описується хвильовою функцією (у свою чергу — елементом проективного гільбертового простору). Це можна виразити як вектор за допомогою нотації

$$f : [a, b] \rightarrow \mathbb{C} \text{ square integrable on } [a, b] \iff \int_a^b |f(x)|^2 dx < \infty$$

Дірака або Бракета:

$$|\psi\rangle = \sum_i c_i |\phi_i\rangle.$$

Кети $|\phi_1\rangle, |\phi_2\rangle, |\phi_3\rangle, \dots$ - різні доступні квантові «альтернативи» — конкретний квантовий стан. Формально вони утворюють ортонормований базис власного вектора $\langle \phi_i | \phi_j \rangle = \delta_{ij}$, де являє дії собою дельту Кронекера.

Для простоти, всі хвильові функції вважаються нормованими і повна ймовірність вимірювання всіх можливих станів дорівнює одиниці:

$$\langle \psi | \psi \rangle = \sum_i |c_i|^2 = 1.$$

Колапс хвильової функції – формальний, а не фізичний процес в якому, квантові системи існують у суперпозиціях тих базових станів, які найбільше відповідають класичним описам, і, за відсутності вимірювання, еволюціонують відповідно до рівняння Шредінгера [5]. Однак, коли проводиться вимірювання, хвильова функція згортається — з точки зору спостерігача — лише до одного з базових станів, і властивість, що вимірюється, однозначно отримує власне значення цього конкретного стану. Після колапсу система знову розвивається відповідно до рівняння Шредінгера:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = \hat{H} |\psi(t)\rangle$$

При застосуванні механізму колапсування виконуються такі етапи:

1. Обирається простір $N \times N$ пікселів, карта зображення ділиться на секції $M \times M$ пікселів (A_1, A_2, A_3, \dots), де N - кратне M (рис. 4).
2. Задаються шаблони-секції розміру $M \times M$ до яких почергово застосовуватиметься колапс.
3. Вибирається випадкова секція, з неї починається яка стає базою для колапсування хвильової функції.
4. З усіх можливих варіантів у вибраній секції задається лише один з можливих варіантів шаблону.
5. З сусідніх до базової секції видаляються всі шаблони, які не задовольняють умову підстановки за початково згенерованою секцією. Критерії можливого сусідства задається перед початком генерації і при необхідності можуть варіативно змінюватись, також можливий варіант визначення сусідніх секцій за семплом, з якого і визначається ймовірність сусідніх пікселів.
6. Процес повторюється до тих пір, поки в кожній з секцій не залишиться лише один варіант підстановки шаблону

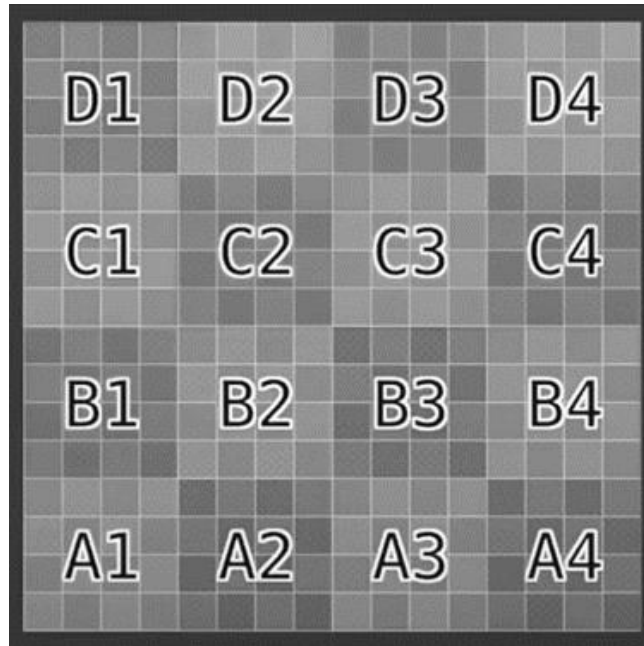


Рис. 4 Матриця секцій MxM

Після практичної оцінки якості роботи алгоритму за наведеною схемою аналізу результатів виявив деякі проблеми:

- алгоритм повністю виконує свою функцію, однак, під час масштабування на більші карти зображення виходять занадто одноманітні;
- в результаті генерації виникають замкнуті системи, в які неможливо потрапити, вони можуть займати великий відсоток ігрового простору, який стає недоступним.

В процесі експериментів було запропоновано варіанти рішення цих проблем. Для проблеми одноманітності рішення виглядає наступним чином:

- генерація розбивається на два етапи. На першому етапі генеруються фрагменти високого рівня (зони), які в свою чергу містять різну специфіку і різні сегменти. Кожна зона в свою чергу вже локально застосовує алгоритм колапсу зі своїм типом шаблонів. Між зонами будуються коридори. На етапі генерації зон високого рівня можна використовувати алгоритм колапсу, або поєднати його з іншими алгоритмами процедурної генерації [4].

Для проблеми замкнутих систем:

- до генерації рівня додається етап постобробки, який проходить по всіх контурах. Якщо контур замикається, то в ньому відбувається заміна елементів та застосовується ще один етап колапсу для розміщення контенту оточення.
- невеликі замкнуті системи по шаблону перекриваються іншими не ігровими об'єктами, які попередньо заготовлені для кожного семплу шаблонів[5].

Принцип роботи алгоритму можна представити у вигляді блок-схем (рис. 5):

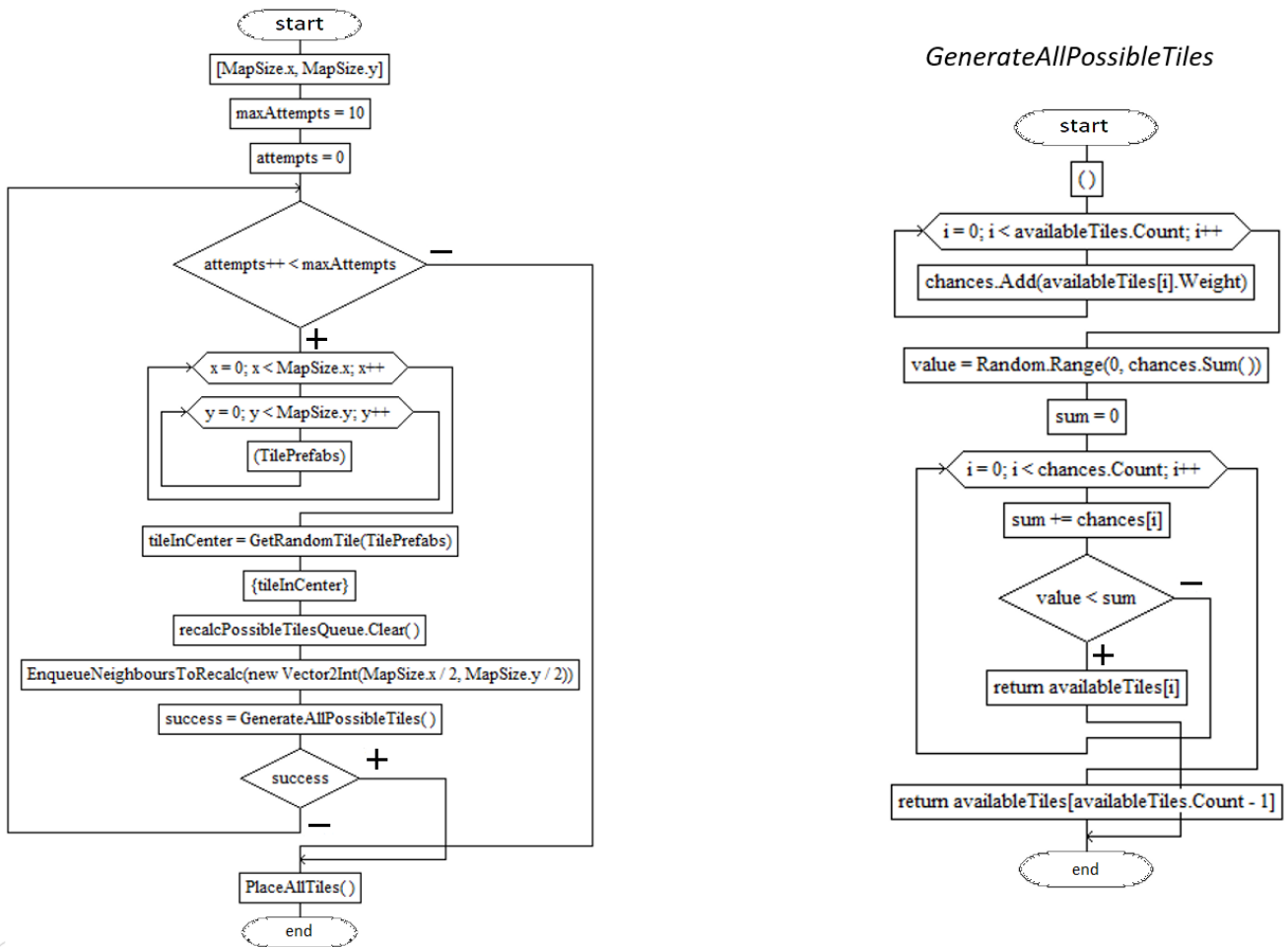


Рис. 5 Блок-схеми роботи алгоритму колапсу хвильової функції

Висновки

Аналіз існуючих підходів дав практичні результати для дослідження та вдосконалення методу побудови простору за допомогою механізму колапсу хвильової функції. Базовий алгоритм доцільно використовувати при генерації абстрактних текстур, або нескладних просторів.

При необхідності генерувати більші та складніші простори алгоритм необхідно модифікувати, аби позбутися виявлених аномалій замкнених просторів та одноманітності згенерованих карт.

Такий спосіб побудови простору має високу чутливість до вхідних даних, тому при підготовці слід звернути особливу увагу на початкові шаблони та семпли, які будуть використані при роботі алгоритму.

Знайдено найефективніший результат роботи алгоритму - поєднання з іншими способами генерації, препроцесінг самого полотна ігрового рівня та постобробка кінцевого результату.

Список використаної літератури

1. Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 2 грудня 2020 р. № 1556-р //URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1>. – 2002. – Т. 80.
2. К Заспа Ю. Гідродинамічно-хвильове калібрування потенціалів в рівняннях максвелла: нелінійна динаміка та когерентність, колапс, розширення та обмінна взаємодія інерційних дисипативно-колекторних збурень в нерівноважних середовищах у комплексному просторі. Спіральна турбулентність та когерентні структури тривимірного часу. – 2022 // Вісник Хмельницького національного університету, №6, Том 1, 2022 (315) – С. 89-92.
3. Теоретична фізика. Квантова механіка [Електронний ресурс] : навч. посіб. Для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» /О. М. Бродин; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2.6Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 58-60 с.
4. Morris Q. E. Modifying Wave Function Collapse for more Complex Use in Game Generation and Design. – 2021.
5. Summerville A. et al. Procedural content generation via machine learning (PCGML) //IEEE Transactions on Games. – 2018. – Т. 10. – №. 3. – С. 257-270.
6. Short T., Adams T. (ed.). Procedural generation in game design. – CRC Press, 2017.
7. Smith, Gillian (2015). An Analog History of Procedural Content Generation (PDF). Foundations of Digital Games 2015. Pacific Grove, California. Retrieved October 7, 2019.
8. Sandhu A., Chen Z., McCoy J. Enhancing wave function collapse with design-level constraints //Proceedings of the 14th International Conference on the Foundations of Digital Games. – 2019. – С. 1-9.

References

1. Approval of the Concept of Artificial Intelligence Development in Ukraine. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated December 2, 2020, No. 1556-r. //URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1>. – 2002. – Vol. 80.
2. K. Zaspas. Hydrodynamic-Wave Calibration of Potentials in Maxwell's Equations: Nonlinear Dynamics and Coherence, Collapse, Expansion, and Exchange Interaction of Inertial Dissipative Collector Perturbations in Non-equilibrium Media in Complex Space. Spiral Turbulence and Coherent Structures of Three-Dimensional Time. – 2022 // Bulletin of Khmelnytsky National University, No. 6, Volume 1, 2022 (315) – P. 89-92.
3. Theoretical Physics. Quantum Mechanics [Electronic resource]: a textbook for bachelor's degree students in the specialty 104 "Physics and Astronomy" / O. M. Brodin; Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. – Electronic text data (1 file: 2.6 MB). – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2022. – P. 58-60.
4. Morris Q. E. Modifying Wave Function Collapse for more Complex Use in Game Generation and Design. – 2021.
5. Summerville A. et al. Procedural content generation via machine learning (PCGML) // IEEE Transactions on Games. – 2018. – Vol. 10. – No. 3. – P. 257-270.
6. Short T., Adams T. (ed.). Procedural generation in game design. – CRC Press, 2017.
7. Smith, Gillian (2015). An Analog History of Procedural Content Generation (PDF). Foundations of Digital Games 2015. Pacific Grove, California. Retrieved October 7, 2019.
8. Sandhu A., Chen Z., McCoy J. Enhancing wave function collapse with design-level constraints // Proceedings of the 14th International Conference on the Foundations of Digital Games. – 2019. – P. 1-9.