

ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ СИМУЛЯЦІЇ РУЙНУВАНЬ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ У ВОКСЕЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

¹Вінницький національний технічний університет

Воксельні моделі широко застосовуються в комп'ютерній графіці, інженерних симуляціях, медичній візуалізації та інтерактивних середовищах, зокрема в системах з динамічно змінною геометрією. На відміну від традиційних полігональних представлень, воксельні середовища не накладають жорстких обмежень на топологію об'єкта, завдяки чому вони є особливо придатними для задач, пов'язаних з моделюванням складних деформаційних процесів.

Моделювання деформацій у воксельних середовищах ґрунтується на поєднанні фізично обґрунтованих та наближених чисельних методів, адаптованих до дискретної структури простору. Кожен воксель розглядається як елемент матеріалу з певними механічними властивостями, взаємодія якого з сусідніми елементами визначає загальну поведінку об'єкта під дією зовнішніх і внутрішніх сил. Такий підхід дає змогу ефективно відтворювати як пружні, так і пластичні деформації, а також процеси локального руйнування.

Водночас воксельне моделювання супроводжується низкою обчислювальних викликів, зокрема високими вимогами до пам'яті, необхідністю забезпечення чисельної стабільності та оптимізації розрахунків для великих обсягів даних. Це зумовлює актуальність дослідження загальних принципів моделювання деформацій у воксельних середовищах, а також аналізу наявних підходів і методів їх практичної реалізації.

Метою статті є узагальнення основних принципів моделювання деформацій у воксельних середовищах, а також розгляд ключових моделей взаємодії вокселів і підходів до забезпечення ефективності та фізичної достовірності таких симуляцій.

Для досягнення поставленої мети розглянуто як традиційні підходи, такі як просте видалення вокселів та алгоритми розповсюдження тріщин, так і сучасніші методи, серед яких масово-пружні системи, процедурна генерація руйнувань та метод матеріальних точок (MPM).

Ключові слова: воксельна графіка, симуляція деформацій, руйнування, метод матеріальних точок, масово-пружні системи, алгоритми розповсюдження тріщин, чисельне моделювання, гібридні підходи, GPU-оптимізація, інтерактивні додатки.

Вступ

Сучасна наука та практика у галузі комп'ютерної графіки, чисельного моделювання та інженерії стикаються з необхідністю розробки високопродуктивних і фізично обґрунтованих методів симуляції деформацій у воксельних середовищах. Ця проблема є надзвичайно актуальною як для інтерактивних додатків і відеоігор, де руйнування об'єктів відіграє важливу роль у створенні реалістичного візуального досвіду [1], [2], так і для наукових і практичних завдань у сфері інженерії та медичної візуалізації, де точне прогнозування поведінки матеріалів під навантаженнями є критичним [3], [4]. Загальна постановка проблеми полягає у пошуку оптимального балансу між обчислювальною ефективністю та фізичною достовірністю симуляції деформацій, що вимагає інтеграції різноманітних підходів та методик.

Найпростіші способи розв'язання цієї задачі базуються на простих алгоритмах, таких як видалення або зміна стану окремих вокселів з досягненням певного порогу впливу [1]. Хоча ці методи забезпечують високу швидкість, але вони не дозволяють адекватно відтворити плавні деформації і складну динаміку руйнувань. Для підвищення рівня реалістичності запропоновано алгоритми розповсюдження тріщин, які враховують фізичні властивості матеріалів і напрямок впливу сил [2]. Подальший розвиток технологій сприяв впровадженню методів масово-пружних систем, де воксели

розглядаються як масові точки, з'єднані пружними елементами [5]. Цей підхід дозволив отримати гнучкішу модель деформацій, проте залишається обмеженим у випадках моделювання нелінійних ефектів та великих деформацій.

Окрім традиційних методів, застосовується також процедурна генерація руйнувань [6] та метод матеріальних точок [7]. Розробка таких методів відкрила нові перспективи, проте їх застосування у реальному часі залишається обмеженим через високі обчислювальні витрати. До того ж, численні дослідження з використання методу скінченних елементів (FEM) [3], [4] продемонстрували можливість високоточного аналізу матеріальних властивостей, але їх інтеграція у воксельні середовища ускладнюється значним зростанням кількості обчислювальних елементів.

Невід'ємною частиною сучасних досліджень є інтеграція гібридних підходів, що поєднують сіткові та частинкові методи. Зокрема, методи Particle-In-Cell (PIC) та їх удосконалені версії, такі як FLIP і APIC [8]—[10], спрямовані на зменшення чисельної дисипації і збереження дрібних деталей потоку у разі симуляції взаємодії рідких та твердих тіл. Застосування таких методів у комбінації з воксельною апроксимацією дозволяє підвищити точність моделювання, проте одночасно створює проблеми з обчислювальною стабільністю та інтеграцією алгоритмів. Використання сучасних GPU-технологій для прискорення обчислень [11] є перспективним напрямом, проте і тут залишаються питання щодо оптимізації розподілу ресурсів і ефективного управління пам'яттю.

Метою статті є систематизація та критичний аналіз наявних методів симуляції деформацій у воксельних середовищах з акцентом на визначення сильних і слабких сторін кожного підходу. Стаття спрямована на ідентифікацію невирішених аспектів, таких як проблеми інтеграції різних методик, оптимізації обчислювальних процесів та забезпечення стабільності симуляцій, що є надзвичайно важливими для розвитку як інтерактивних додатків, так і наукових досліджень. Запропонований аналіз базується на численних публікаціях [1]—[4], [5]—[7], [11]—[13], що дозволяє окреслити загальну картину розвитку методів симуляції деформацій та визначити перспективні напрями для подальшого вдосконалення алгоритмів.

Отже, це дослідження має як наукове, так і практичне значення, оскільки узагальнює наявні знання у сфері симуляції деформацій та відкриває нові можливості для розробки інноваційних методик, здатних забезпечити високу реалістичність та ефективність симуляцій у воксельних середовищах. Отримані результати можуть стати основою для розробки інтерактивних систем, вдосконалення алгоритмів візуалізації руйнувань і деформацій, а також для розв'язання складних інженерних задач, пов'язаних з аналізом поведінки матеріалів під дією різних навантажень.

Огляд наявних методів воксельних симуляцій деформацій

Базовим підходом до симуляції руйнувань у воксельних середовищах є видалення або зміна стану вокселів за виконання певних умов, таких як перевищення порогу сили або певного впливу на конкретний воксель [1]. Цей метод широко використовується в відеоіграх, таких як "Minecraft", де блоки знищуються після певної кількості ударів. До переваг такого методу відноситься простота реалізації, яка не вимагає складних алгоритмів, як результат обчислювальні витрати є мінімальними. Такий метод підходить для інтерактивних додатків. Недоліком є низька реалістичність через відсутність плавних деформацій або тріщин.

Алгоритми розповсюдження тріщин застосовуються для моделювання поширення тріщин через воксельну сітку на основі фізичних законів або емпіричних правил [2]. Після первинного пошкодження тріщина розповсюджується, враховуючи властивості матеріалу та напрямки сил. Як результат, руйнування є правдоподібнішими, за потреби є можливість за рахунок алгоритмів контролювати поведінку та налаштовувати параметри матеріалу. Водночас розробка таких алгоритмів є трудомісткою та вимагає більше обчислювальних ресурсів у разі виконання симуляцій пропорційно величині сцени.

У масово-пружних системах (рис. 1) вокселі розглядаються як маси, з'єднані пружинами з сусідніми вокселями [5]. Воксельне середовище представлено у вигляді дискретної

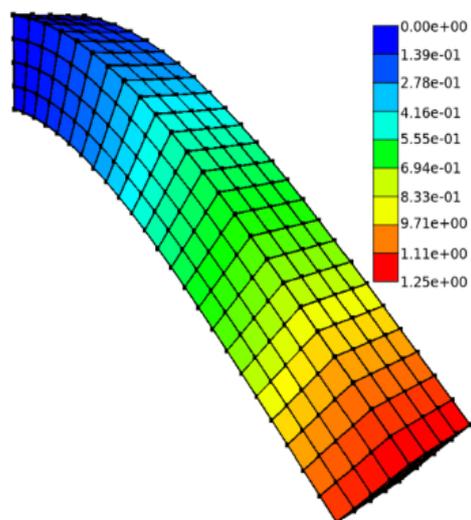


Рис. 1. Візуалізація симуляції за допомогою масово-пружної системи

тривимірної сітки, вузли якої відповідають вокселям, що розглядаються як матеріальні точки з масами, з'єднані лінійними пружними зв'язками з сусідніми елементами. Під дією зовнішнього навантаження відбувається згин тіла, який супроводжується нерівномірним просторовим розподілом деформацій.

Візуалізацію результатів виконано із застосуванням стандартних засобів тривимірної графіки MATLAB. Кольорове кодування відображає відносну величину деформацій (або еквівалентних напружень) у діапазоні від мінімальних значень, позначених синім кольором, до максимальних значень, позначених червоним кольором. Видима сіткова структура підкреслює дискретний характер моделі та локальну взаємодію між елементами масово-пружної системи.

Оформлення параметрів чисельного експерименту подано у вигляді табл. 1.

Таблиця 1

Параметри чисельного експерименту моделювання деформації воксельного тіла у масово-пружній системі

Геометрія об'єкта	Співвідношення розмірів сітки вокселів щодо навантажень	Прямокутна балка
Розмір сітки вокселів	$N_x \times N_y \times N_z N_x \times N_y \times N_z$	40×10×10
Розмір одного вокселя	Hhh	1,0
Маса одного вокселя	Mmm	1,0
Коефіцієнт жорсткості пружних зв'язків	Kkk	500
Коефіцієнт демпфування	Ccc	0,1
Крок інтегрування за часом	$\Delta t \Delta t$	0,001
Кількість часових кроків	$N_t N_t$	5000
Тип зовнішнього навантаження	—	зосереджене
Напрямок дії навантаження	—	перпендикулярно до поздовжньої осі
Граничні умови	—	жорстке закріплення одного торця
Критерій завершення розрахунку	—	досягнення квазістатичного стану
Програмне середовище	—	MATLAB

Процедурні методи використовують алгоритми для генерації руйнувань на основі випадкових або детерміністичних функцій, таких як шум Перліна або фрактальні алгоритми [6]. Це дозволяє створювати високодеталізовані розповсюдження руйнувань без зберігання великих масивів даних. Є можливість гнучко налаштовувати стиль руйнувань, водночас якщо параметри налаштовані неправильно, деформація буде виглядати неприродно. Також цей спосіб не відповідає реальній фізиці, (адже відсутня його фізична інтерпретація) у воксельних середовищах поєднує переваги Лагранжових і Ейлерових підходів, вважаючи матеріал як набір частинок, які рухаються через дискретну сітку [7]. Це дозволяє моделювати складні деформації та руйнування, зокрема, великі пластичні деформації, тому цей метод є високореалістичним та придатний для різних типів матеріалів, зокрема, гранульовані та в'язко-пружні. Цей метод вимагає великих обчислювальних витрат та складний в реалізації через потребу у глибокому розумінні чисельних методів.

Також існують гібридні підходи, які поєднують кілька різних методів, до прикладу, використання масово-пружних систем для глобальних деформацій та процедурної генерації для деталей руйнування [14]. Це дозволяє поєднувати переваги різних методів та за потреби налаштовувати баланс між реалістичністю та продуктивністю, але водночас інтеграція може бути складною через необхідність забезпечення сумісності різних методів. На основі проаналізованих матеріалів можемо побудувати порівняльну таблицю методів (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняння розглянутих методів симуляції деформацій

Метод	Реалістичність	Продуктивність	Складність реалізації	Сфери застосування
Просте видалення вокселів	низька	висока	низька	прості ігри, інтерактивні додатки
Алгоритми розповсюдження тріщин	середня	середня	середня	ігри з акцентом на фізику, симуляції руйнувань
Масово-пружні системи	висока	низька	висока	реалістичні симуляції, дослідницькі проекти
Процедурна генерація руйнувань	середня	висока	середня	візуальні ефекти
Метод матеріальних точок	висока	низька	висока	наукові симуляції, кінематографічні ефекти

Методи симуляції руйнувань у воксельних середовищах варіюються за складністю, продуктивністю та рівнем реалістичності. Для простих додатків та інтерактивних систем реального часу підходить просте видалення вокселів, забезпечуючи високу продуктивність за мінімальних витрат. Алгоритми розповсюдження тріщин та процедурна генерація пропонують баланс між реалістичністю та швидкодією, придатних для ігор та інтерактивних додатків. Масово-пружні системи та метод матеріальних точок надають високий рівень реалістичності, але вимагають значних ресурсів і складні в реалізації, тому використовуються в наукових та високоякісних візуальних проєктах. Як і в більшості подібних систем спостерігаємо обернено-пропорційну залежність між реалістичністю та продуктивністю.

Отже, основними виявленими недоліками є складність реалізації, високі обчислювальні витрати та низька реалістичність або відсутність врахування фізичних властивостей. Використання воксельних симуляцій в реальному часі залишається викликом через високі обчислювальні витрати, тому оптимізація є перспективним напрямком для подальших досліджень. В роботі [11] запропоновано методи GPU-оптимізації для прискорення симуляцій, але є простір для подальшого поліпшення алгоритмів та використання сучасних апаратних технологій. Більшість моделей використовують спрощені лінійні матеріальні властивості, у дослідженні [7] вивчено впровадження методу матеріальних точок для симуляції нелінійних матеріалів, таких як сніг, що відкриває можливості для моделювання складних матеріалів. В роботі [12] досліджено методи анімації еластичних та пластичних об'єктів, що можуть генеративні моделі для 3D-форм, бути основою для подальшого розвитку в цій сфері. Ефективне виявлення та обробка колізій між деформованими об'єктами залишається складним завданням. Автори роботи [13] дослідили, що для симуляції руйнувань можливе застосування динамічної моделі першого порядку, що базується на частинках та обмеженнях. Вона моделює динаміку об'єктів шляхом прямої маніпуляції положеннями частинок зі швидкостями, обчисленими пізніше. Це має свої переваги та недоліки, головною перевагою є стабільність такого методу. Під час кроку розв'язання положення можна неявно перепроєктувати, немає потреби в кроці інтегрування. В роботі [14] запропоновано використання платформи MeshGraphNets, для навчання ситчасних симуляцій з використанням графових нейронних мереж. Він є високоефективним, працює на 1—2 порядки швидше, ніж симуляція, на якій він навчається.

Метод NeRF досягає найсучасніших результатів для синтезу нових видів складних сцен шляхом оптимізації базової неперервної об'ємної функції сцени з використанням розрідженого набору входних видів. Алгоритм методу представляє сцену за допомогою повністю зв'язаної (незгорткової) глибокої мережі [15]

Враховуючи сучасні тенденції розвитку штучного інтелекту та його впровадження для оптимізації в різних сферах комп'ютерного моделювання, використання нейронних мереж для прогнозування руйнувань або прискорення симуляцій є перспективним напрямком.

Огляд фізично обґрунтованих методів та перспективи їх застосування

Моделювання руйнувань є фундаментальним інструментом у галузях механіки матеріалів, інженерії та фізики, що дозволяє досліджувати поведінку матеріалів і структур під дією різних навантажень. Розуміння та передбачення руйнувань є критично важливим для забезпечення ефективності конструкцій та безпеки, у мікроскопічних компонентах та у масштабних інженерних спорудах. Методи симуляції фізичних процесів мають свої переваги та обмеження в контексті воксельної графіки.

Протягом останніх десятиліть розроблено та удосконалено низку методів моделювання, кожний з яких має свої переваги та обмеження. Фізично обґрунтовані методи, такі як метод скінченних елементів (FEM), стали стандартом у чисельному аналізі механічних систем завдяки своїй універсальності та широкому впровадженню в інженерну практику [3]. У цьому розділі роботи детально проаналізовано наявні методи симуляції руйнувань, розглянуто їх теоретичні основи, сфери застосування, а також виконано порівняння їх ефективності та обмежень. Це дозволить визначити можливі перспективні підходи для подальших досліджень у сфері моделювання руйнувань з застосуванням воксельних моделей.

Метод скінченних елементів (англ. Finite element method, FEM) є чисельним підходом для розв'язання диференціальних рівнянь, що описують фізичні явища в континуальних середовищах [3]. Об'єкт розбивається на малі вузли (кінцеві елементи), до кожного з яких застосовуються локальні рівняння. Це дозволяє моделювати складні геометрії та матеріальні властивості з високою точністю. Метод пропонує високу точність та здатність прогнозувати різноманітні ситуації, враховуючи застосовані матеріали та механічні властивості об'єкта. Для реалізації метод вимагає наявності

значних ресурсів, особливо для тривимірних моделей, в результаті чого складно досягти симуляції в реальному часі, що обмежує використання в інтерактивних додатках.

FEM може бути застосований у воксельній графіці шляхом розгляду кожного вокселя як елемента сітки. Проте через велику кількість елементів це призводить до значної обчислювальної навантаженості. Тому в чистому вигляді FEM нечасто використовується у воксельних середовищах, але може бути ефективним у разі застосування оптимізацій або спрощених моделей. Але для статичних або менш ресурсозатратних задач, де є важливою точність, FEM може бути використаний в контексті воксельних об'єктів [4], наприклад, в медичній візуалізації для моделювання тканин [16].

Масово-пружні системи (англ. Mass-Spring Systems, MSS) моделюють об'єкти як набори масових точок (мас), з'єднаних між собою пружними елементами (пружинами) [17]. Цей метод дозволяє моделювати руйнування з відносно низькими обчислювальними витратами. Метод є високопродуктивним, що створює можливість симуляції в реальному часі та простий у впровадженні та налаштуванні моделі. Але у порівнянні з FEM метод показує нижчу точність, у разі моделювання складних матеріалів можлива нестабільність без додаткових корекцій.

У воксельній графіці масово-пружні системи можуть бути ефективно застосовані шляхом представлення вокселів як масових точок [18]. Пружні зв'язки між сусідніми вокселями дозволяють моделювати руйнування об'єктів. Цей підхід широко використовується в інтерактивних додатках і відеоіграх завдяки своїй ефективності. Представлення вокселів як мас, з'єднаних пружинами, дозволяє ефективно моделювати руйнування в реальному часі [19].

Гідродинаміка згладжених частинок (ГЗЧ, англ. Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) – це безсітковий метод моделювання рідин та газів, де середовище представлено як набір частинок [20]. Кожна частинка несе фізичні властивості і взаємодіє з сусідніми через згладжувальні функції. Цей метод дозволяє моделювати складні плинні середовища. Проте метод погано пристосований для симуляції твердих тіл та їх взаємодії, потребує великої кількості обчислювальних ресурсів для симуляції великої кількості частинок.

SPH не пристосований для воксельної графіки, оскільки метод базується на частинках, а не на фіксованій сітці вокселів. Проте, є можливість поєднати SPH з воксельною апроксимацією для моделювання рідин у воксельних середовищах [21]. Це дозволяє моделювати текучі середовища у воксельній графіці, відображати взаємодію рідин з твердими об'єктами, але вимагає значних обчислювальних ресурсів для інтеграції частинкової та воксельної репрезентацій, що є обмеженням для систем реального часу [22], [23]. Деякі симуляції інтерактивних рідин використовують SPH разом з воксельною сіткою для відображення детальних ефектів рідини [24].

Методи симуляції фізичних процесів мають свої переваги та обмеження в контексті воксельної графіки. Масово-пружні системи виступають оптимальним вибором для реалістичних симуляцій в реальному часі завдяки їх простоті та ефективності. FEM забезпечує високу точність, але він обмежений у застосуванні через обчислювальні витрати. SPH придатний для моделювання рідин, але складність інтеграції з воксельною графікою обмежує його використання. Вибір методу залежить від поставлених завдань, вимог до точності та продуктивності. Порівняння описаних методів на основі проаналізованих матеріалів подано в табл. 3.

Таблиця 3

Порівняння розглянутих фізично-обґрунтованих методів

Критерій	FEM	Масово-пружні системи	SPH
Точність	Висока	Середня	Середня
Обчислювальна складність	Висока	Середня	Висока
Придатність для реального часу	Низька	Висока	Низька
Складність реалізації	Висока	Низька	Висока
Застосування у вокселях	Обмежено можливе	Можливе	Обмежено можливе

Також в контексті моделювання фізичних об'єктів варто розглянути гібридні методи, що поєднують частинкові та сіткові підходи для точного та ефективного моделювання, такі як Particle-In-Cell, Fluid-Implicit Particle, Affine Particle-In-Cell та Material Point Method, що є провідними для симуляції рідин та твердих тіл. Ці методи мають потенціал для застосування у воксельній графіці шляхом інтеграції з дискретними представленнями простору.

Метод Particle-In-Cell (PIC) розроблений для моделювання плазми та використовується для симуляції рідин і газів [8]. У PIC методі частинки несуть інформацію про масу, швидкість та інші

властивості, тоді як вимірювання фізичних величин відбувається на фіксованій сітці (клітинках). Метод дозволяє моделювати складні плинні середовища. Недоліком методу є нумерична дисипація, що створює схильність до згладжування деталей потоку через перенесення між частинками та сіткою.

PIC може бути застосований у воксельних середовищах шляхом використання воксельної сітки як обчислювальної сітки. Це дозволяє інтегрувати симуляцію рідин з воксельними представленнями сцен [25].

Метод Fluid-Implicit Particle (FLIP) є поліпшенням PIC, яке мінімізує нумеричну дисипацію [9]. У методі FLIP різниця швидкостей між частинками та сіткою використовується для обчислення змінних, що зберігають дрібні деталі потоку. У порівнянні з PIC метод краще зберігає деталі і турбулентні структури у потоці. У результаті досліджень виявлено можливу нестабільність за високих швидкостях або великих градієнтах.

Як і PIC, FLIP може бути інтегрований з воксельними сітками. Це дозволяє симулювати рідини з високою деталізацією у воксельних середовищах, зберігаючи при цьому ефекти розбризкування та турбулентності [26].

Метод Affine Particle-In-Cell є подальшим розвитком методів PIC та FLIP. Головною ідеєю є перенесення не лише скалярних величин, але й афінних моментів частинок до сітки [10], що прокрашує збереження кутового моменту і зменшує нумеричну дисипацію, що у порівнянні з методами PIC та FLIP більше поліпшує збереження деталей потоку, зменшує артефакти, пов'язані з трансфером імпульсу між частинками та сіткою. Недоліком такого методу є ще більша обчислювальна складність порівняно з PIC та FLIP.

APIC може бути застосований для симуляції рідин та твердих тіл у воксельних середовищах з ще вищою точністю та стабільністю. Це особливо корисно для моделювання складних взаємодій між рідинами та воксельними об'єктами [27].

MPM, згаданий раніше в цій роботі, є розвитком PIC методу для моделювання суцільних середовищ, зокрема, твердотільні руйнування [28]. У MPM матеріал представлений як набір матеріальних точок (частинок), що рухаються у фоновій сітці. Сітка використовується для обчислення градієнтів та сил, але не рухається з матеріалом. Метод дозволяє ефективно моделювати контакти та зіткнення, великі руйнування.

MPM широко застосовується в поєднанні з воксельною графікою, оскільки фонові сітка може бути воксельною сіткою [30]. Це дозволяє ефективно моделювати руйнування воксельних об'єктів, зокрема складні матеріали, такі як пісок (рис. 2), сніг або тканини.

У всіх розглянутих методах фонові сітка може бути представлена у вигляді дискретної сітки, тому методи є потужними інструментами для симуляції фізичних процесів, таких як складні взаємодії між рідинами, твердими тілами та гранульованими матеріалами у воксельних середовищах. Прикладами таких інтеграцій є моделювання поведінки снігу у воксельних сценах та його взаємодії з твердими об'єктами [31], [32]. Дослідження інтеграції інших описаних гібридних методів в воксельні середовища є перспективним задля досягнення більшої продуктивності.

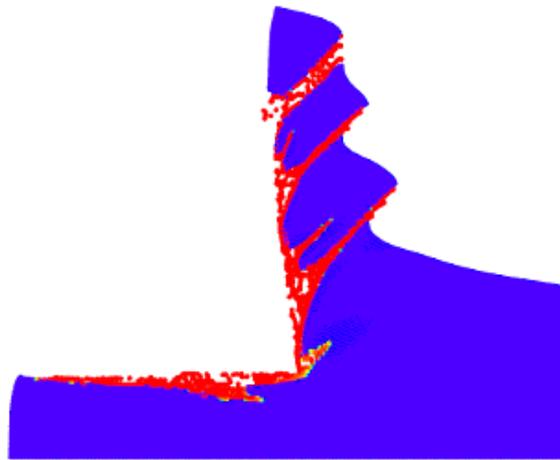


Рис. 2. Візуалізація симуляції за допомогою методу MPM

Висновки

У цій роботі проведено комплексний аналіз сучасних методів симуляції руйнувань у воксельних середовищах, що дозволяє узагальнити як традиційні алгоритмічні підходи, так і складні фізично обґрунтовані моделі. Розглянуті методи, від простого видалення вокселів [1] та алгоритмів розповсюдження тріщин [2] до масово-пружних систем [24] і методу матеріальних точок [26], демонструють явний компроміс між високою продуктивністю та точністю моделювання. Простий підхід дозволяє досягти швидкодії, що є важливим для інтерактивних додатків, але водночас не забезпечує належного рівня реалістичності руйнувань. До того ж, складніші моделі здатні точно відтворювати фізичні властивості матеріалів та їх поведінку під навантаженням, проте потребують значних обчислювальних ресурсів.

Аналіз літератури [1]—[7], [11]—[13] підтверджує, що основним викликом залишається інтеграція різних підходів для оптимального співвідношення між обчислювальною ефективністю та фізичною достовірністю симуляцій. Особливо актуальним є питання стабільності чисельних алгоритмів для моделювання великих руйнувань, а також потреба в оптимізації процесів за допомогою сучасних GPU-технологій [11] та алгоритмів машинного навчання.

Отримані результати свідчать про необхідність подальших досліджень у напрямку розробки гібридних моделей, які поєднують переваги як сіткових, так і частинкових підходів (до прикладу, методи PIC, FLIP, APIC [8]—[10]). Такий підхід може сприяти зменшенню чисельної дисипації та збереженню дрібних деталей потоку у разі моделювання взаємодії рідких та твердих тіл.

Таким чином, основним досягненням дослідження є виявлення ключових переваг та обмежень кожного з розглянутих методів, що дозволяє окреслити перспективні напрямки подальшої оптимізації алгоритмів симуляції руйнувань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] J. Zadick, B. Kenwright, and K. Mitchell, "Integrating Real-Time Fluid Simulation with a Voxel Engine," *The Computer Games Journal*, no. 5, pp. 56-64, September. 2016. <https://doi.org/10.1007/s40869-016-0020-5>.
- [2] H. N. Iben, and J. F. O'Brien, "Generating Surface Crack Patterns," *Graphical Models*, vol. 71, no. 6, pp. 198-208, January. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2008.12.005>.
- [3] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and J. Z. Zhu, *The Finite Element Method*. Butterworth-Heinemann, United Kingdom, 2013. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-24909-9>.
- [4] T. Chakkour, "Finite element modelling of complex 3D image data with quantification and analysis," *Oxford Open Materials Science*, vol. 4, no. 1, pp. 51-71, February. 2024. <https://doi.org/10.1093/oxfmat/itae003>.
- [5] A. Nealen, M. Müller, R. Keiser, E. Boxerman, and M. Carlson, "Physically Based Deformable Models in Computer Graphics," *Computer Graphics Forum*, vol. 25, no. 4, pp. 809-836, December. 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2006.01000.x>.
- [6] A. Lagae, and P. Dutré, "A Comparison of methods for procedural noise," *Computer Graphics Forum*, vol. 27, no. 1, pp. 114-129, 2008. October. 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2007.01100.x>.
- [7] A. Stomakhin, C. Schroeder, L. Chai, J. Teran, and A. Selle, "A Material Point Method for Snow Simulation," *Transactions on Graphics*, vol. 32, no. 102, pp.1-10, July. 2013. <https://doi.org/10.1145/2461912.2461948>.
- [8] F. H. Harlow, "The Particle-In-Cell Computing Method for Fluid Dynamics," *Methods in Computational Physics*, vol. 3, pp. 319-343, March. 1962. <https://doi.org/10.2172/4769185>.
- [9] J. U. Brackbill, and H. M. Ruppel, "A Method for Adaptively Zoned, Particle-In-Cell Calculations of Fluid Flows in Two Dimensions," *Journal of Computational Physics*, vol. 65, no. 2, pp. 314-343, August. 1986. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(86\)90211-1](https://doi.org/10.1016/0021-9991(86)90211-1).
- [10] C. Jiang, C. Schroeder, A. Selle, J. Teran, and A. Stomakhin, "The Affine Particle-In-Cell Method," *Transactions on Graphics*, vol. 34, no. 4, pp. 1-10, July. 2015. <https://doi.org/10.1145/2766996>.
- [11] H. Lu, W. Chang, T. Hedstrom, and Tzu-M. Li, "Real-Time Path Guiding Using Bounding Voxel Sampling," *Transactions on Graphics*, vol. 43, no. 125, pp. 1-14, July. 2024. <https://doi.org/10.1145/3658203>.
- [12] M. Müller, R. Keiser, A. Nealen, M. Pauly, M. Gross, and M. Alexa "Point based animation of elastic, plastic and melting objects," *Eurographics Symposium on Computer Animation*, no. 4, pp. 141-151, August. 2004. <https://doi.org/10.1145/1028523.1028542>.
- [13] J. Wu, C. Zhang, T. Xue, W. T. Freeman, and J. B. Tenenbaum, "Learning a Probabilistic Latent Space of Object Shapes via 3D Generative-Adversarial Modeling," *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 82, no. 90, pp. 1-11, Jan. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1610.07584>.
- [14] C. Yuksel, D. H. House, and J. Keyser, "Wave Particles," *Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 3, pp. 99-110, July. 2007. <https://doi.org/10.1145/1275808.1276501>.
- [15] Маттіас Мюллерм, Майлз Маклін, Нуттапонг Чентанез, Стефан Єшке, і Те-Йонг Кім, «Детальне моделювання твердого тіла з розширеною динамікою на основі позиції.» *Форум комп'ютерної графіки*, т. 39, вип. 8, с. 101-112, 2020.
- [16] T. Pfaff, M. Fortunato, A. Sanchez-Gonzalez, and P.W. Battaglia, "Learning Mesh-Based Simulation with Graph Networks," *International Conference on Learning Representations*, no. 4, pp.1-12, Jun. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.03409>.
- [17] Ben Mildenhall, et all., UC Berkeley. Google Research. UC San Diego. "NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis," rXiv:2003.08934v2 [cs.CV] 3 Aug 2020.
- [18] Y. Zhou, H. Lu, G. Wang, and W. Li, J. Wang, "Voxelization modelling based finite element simulation and process parameter optimization for Fused Filament Fabrication," *International Journal of Modeling and Simulation*, no. 4.0, pp. 187-210, December, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108409>.
- [19] X. Provot, "Deformation Constraints in a Mass-Spring Model to Describe Rigid Cloth Behavior," *Institut National de Recherche en Informatique et Automatique*, no. 105, pp. 99-104, September. 1995.
- [20] L. L. Chang, and D. S. Liu, "Deformable object simulation in virtual environment," *Virtual reality continuum and its applications*, no. 6, pp. 327-330, June. 2006. <https://doi.org/10.1145/1128923.1128979>.
- [21] M. Müller, J. Stam, D. James, and N. Thürey, "Real Time Physics: Class Notes," *Siggraph Classes*, no. 88, pp. 1-90, August. 2008. <https://doi.org/10.1145/1401132.1401245>.
- [22] J. J. Monaghan, "Smoothed Particle Hydrodynamics," *Reports on Progress in Physics*, vol. 68, no. 8, pp. 34-84, July. 2005. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/8/R01>.
- [23] N. Akinci, M. Ihmsen, G. Akinci, B. Solenthaler, and M. Teschner, "Versatile Rigid-Fluid Coupling for Incompressible

SPH,” *Transactions on Graphics*, vol. 31, no. 62, pp. 1-8, July. 2012. <https://doi.org/10.1145/2185520.2185558> .

[24] B. Solenthaler, and R. Pajarola, “Density Contrast SPH Interfaces,” *Eurographics Symposium on Computer Animation*, no. 8, pp. 211-218, July. 2008. <https://doi.org/10.5167/uzh-9734> .

[25] T. McGraw, “Gram-Schmidt voxel constraints for real-time destructible soft bodies,” *Interaction and Games*, no. 4, pp. 1-10, November. 2024. <https://doi.org/10.1145/3677388.3696322> .

[26] R. Keiser, B. Adams, D. Gasser, P. Bazzi, P. Dutré, and M. Gross, “A Unified Lagrangian Approach to Solid-Fluid Animation,” *VGTC conference on Point-Based Graphics*, no. 5, pp. 125-133, June. 2005.

[27] F. Losasso, J. O. Talton, N. Kwatra, R. Fedkiw, “Two-way Coupled SPH and Particle Level Set Fluid Simulation,” *Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 14, no. 4, pp. 797-804, July. 2008. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2008.37> .

[28] Y. Zhu, and R. Bridson, “Animating Sand as a Fluid,” *Transactions on Graphics*, no. 5, pp. 965-972, July. 2005. <https://doi.org/10.1145/1186822.1073298> .

[29] C. Fu, Q. Guo, T. Gast, C. Jiang, and J. Teran, “A Polynomial Particle-In-Cell Method,” *Transactions on Graphics*, vol. 36, no. 222, pp. 1-12, November. 2017. <https://doi.org/10.1145/3130800.3130878> .

[30] D. Sulsky, Shi-J. Zhou, and H. L. Schreyer, “Application of a Particle-in-Cell Method to Solid Mechanics,” *Computer Physics Communications*, vol. 96, no. 1, pp. 105-106, June. 1995. [https://doi.org/10.1016/0010-4655\(94\)00170-7](https://doi.org/10.1016/0010-4655(94)00170-7) .

[31] A. Stomakhin, C. Schroeder, C. Jiang, L. Chai, J. Teran, and A. Selle, “Augmented MPM for Phase-Change and Varied Materials,” *Transactions on Graphics*, vol. 33, no. 4, pp. 1-11, July. 2014. <https://doi.org/10.1145/2601097.2601176> .

[32] M. Gao, et al., “Animating Fluid Sediment Mixture in Particle-Laden Flows,” *Transactions on Graphics*, vol. 37, no. 149, pp. 1-11, July. 2018. <https://doi.org/10.1145/3197517.3201309> .

Рекомендована кафедрою обчислювальної техніки

Стаття надійшла до редакції 27.02.2025

Даниленко Максим Сергійович — аспірант кафедри обчислювальної техніки, e-mail: maksim-danilenko1999@gmail.com ;

Колесник Ірина Сергіївна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки, e-mail: iskolesnyk@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

M. S. Danylenko¹

I. S. Kolesnyk¹

Review of Modern Destruction Simulation Methods and their Application in Voxel-Based Environments

¹Vinnitsia National Technical University

An extensive analysis of modern methods for deformation simulation in voxel environments is presented in the article, particularly focusing on techniques used for modeling destructions and complex material deformations. Both traditional approaches, such as simple voxel removal and crack propagation algorithms, as well as more advanced methods—including mass-spring systems, procedural destruction generation, and the material point method (MPM) — are examined. The former are characterized by high performance and ease of implementation; however, their application is limited by insufficient physical realism and an inability to adequately reproduce smooth deformations. In contrast, the MPM method enables the modeling of large plastic deformations and destructions with high accuracy, although it demands significant computational resources and is complex to implement.

Additionally, the work presents a comparative analysis of physically-based modeling methods, highlighting the finite element method (FEM), mass-spring systems, and smoothed particle hydrodynamics (SPH). Special attention is paid to hybrid approaches, particularly the PIC, FLIP, and APIC methods, which combine the advantages of both particle-based and grid-based techniques. These methods help reduce numerical dissipation and preserve detailed flow features when simulating complex physical processes, thereby contributing to a more accurate reproduction of turbulent structures and the interaction between fluids and solids—a factor crucial for applications in cinematic effects and scientific research.

The article outlines the main advantages and disadvantages of each examined approach, shedding light on the limitations of current deformation simulation technologies in voxel environments. Promising directions for future research are proposed, including algorithm optimization through GPU technologies and the application of neural networks for predicting material behavior. The obtained results are relevant not only for the development of interactive applications and video games but also for scientific and engineering studies aimed at improving methods for modeling complex physical phenomena.

Keywords: voxel graphics, deformation simulation, destruction, material point method, MPM, mass-spring systems, crack propagation algorithms, numerical modeling, hybrid approaches, GPU optimization, interactive applications.

Danylenko Maksym S. — Post-Graduate Student of the Chair of Computer Engineering, e-mail: maksim-danilenko1999@gmail.com ;

Kolesnyk Iryna S. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Computer Engineering, e-mail: iskolesnyk@gmail.com