

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ СИМУЛЯЦІЇ РУЙНУВАНЬ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У дослідженні проведено всебічний аналіз сучасних методів симуляції деформації у воксельних середовищах, зокрема методів, які використовуються для моделювання руйнувань та складних деформацій матеріалів. Дослідження окреслює основні переваги та недоліки кожного з розглянутих підходів, висвітлюючи обмеження сучасних технологій симуляції деформацій у воксельних середовищах.

Ключові слова: симуляція деформацій, руйнування, метод матеріальних точок, чисельне моделювання.

Abstract

The study provides a comprehensive analysis of modern methods for simulating deformations in voxel environments, in particular, methods used for modeling fractures and complex deformations of materials. The study outlines the main advantages and disadvantages of each of the considered approaches, highlighting the limitations of modern technologies for simulating deformations in voxel environments.

Keywords: deformation simulation, fracture, material point method, numerical modeling.

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 вирішення цієї задачі базуються на простих алгоритмах, таких як видалення або зміна стану окремих вокселів при досягненні певного порогу впливу [1]. Хоча ці методи забезпечують високу швидкість, вони не дозволяють адекватно відтворити плавні деформації і складну динаміку руйнувань. Для підвищення рівня реалістичності було запропоновано алгоритми розповсюдження тріщин, які враховують фізичні властивості матеріалів і напрямок впливу сил [2]. Подальший розвиток технологій сприяв впровадженню методів масово-пружних систем, де вокселі розглядаються як масові точки, з'єднані пружними елементами [5]. Цей підхід дозволив отримати більш гнучку модель деформацій, проте залишається обмеженим у випадках моделювання нелінійних ефектів та великих деформацій.

Основна частина

Найбільш базовим підходом до симуляції руйнувань у воксельних середовищах є видалення або зміна стану вокселів при виконанні певних умов, таких як перевищення порогу сили або певного впливу на конкретний воксель [1].

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 напрямок сил.

У масово-пружних системах (рис. 1) воксели розглядаються як маси, з'єднані пружинами з сусідніми вокселями [5]. При застосуванні сил система реагує деформаціями, які можуть призвести до руйнувань при перевищенні межі пружності. Такий метод дозволяє реалістично моделювати деформації і руйнування, за рахунок врахування фізичних властивостей можна задавати різні параметри матеріалів.

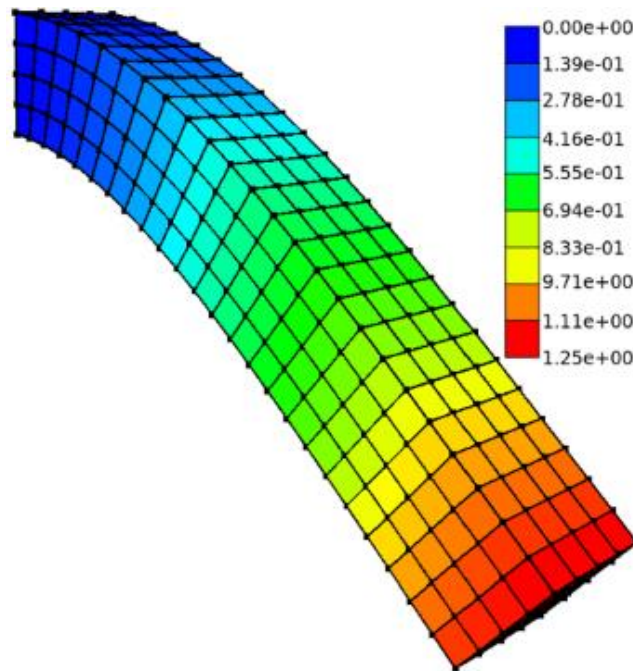


Рисунок 1 — Візуалізація симуляції за допомогою масово-пружної системи

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.

Метод матеріальних точок (MPM) у воксельних середовищах поєднує переваги Лагранжевих і Ейлерових підходів, представляючи матеріал як набір частинок, які рухаються через дискретну сітку [7]. Це дозволяє моделювати складні деформації та руйнування, включаючи великі пластичні деформації, тому цей метод є високореалістичним та підходить для різних типів матеріалів, включаючи гранульовані та в'язко-пружні.

Також існують гібридні підходи, які поєднують кілька різних методів, наприклад, 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. 1).

Таблиця 1 — 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, ігри з великими світами
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 при мінімальних витратах. Алгоритми розповсюдження тріщин та процедурна генерація пропонують баланс між реалістичністю та швидкістю, підходячи для ігор та інтерактивних додатків.

Висновки

У даному дослідженні проведено комплексний аналіз сучасних методів симуляції деформацій 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 [4] і методу матеріальних точок (MPM) [6] – 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 деформацій. У свою чергу, більш складні моделі, такі як MPM, здатні точно відтворювати фізичні властивості матеріалів та їх поведінку під навантаженням, проте потребують значних обчислювальних ресурсів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. J. Zadick, B. Kenwright, 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, 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, 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, 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, P. Dutré, "A Comparison of methods for procedural noise," Computer Graphics Forum, 2008, vol. 27, no. 1, pp. 114-129, October. 2007, <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2007.01100.x>.

Даниленко Максим Сергійович — аспірант кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Колесник Ірина Сергіївна — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки. Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Danylenko Maksym Serhiiovych , Post-Graduate Student of the Chair of Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Kolesnyk Iryna Serhiivna , PhD, Associate Professor of Computer Engineering, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia