

АНАЛІЗ ФІЗИЧНО ОБҐРУНТОВАНИХ МЕТОДІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У дослідженні проведено порівняльний аналіз фізично обґрунтованих методів моделювання, серед яких виділено метод скінченних елементів (FEM), масово-пружні системи та гідродинаміку згладжених частинок (SPH). Особлива увага приділяється гібридним підходам, зокрема методам PIC, FLIP та APIC, що поєднують переваги як частинкових, так і сіткових методів, що дозволяє зменшити чисельну дисипацію і зберегти деталі потоку при симуляції складних фізичних процесів.

Ключові слова: воксельна графіка, масово-пружні системи, гібридні підходи, GPU-оптимізація.

Abstract

The study provides 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.

Keywords: voxel graphics, mass-spring systems, hybrid approaches, GPU optimization.

Вступ

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

Протягом останніх десятиліть було розроблено та удосконалено ряд методів моделювання, кожен 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 [1]. У цьому розділі роботи буде здійснено детальний аналіз існуючих методів симуляції руйнувань та деформацій, розглянуто їх теоретичні основи, сфери застосування, а також буде виконано порівняння їх ефективності та обмежень. Це дозволить визначити можливі перспективні підходи для подальших досліджень у сфері моделювання деформацій з застосуванням воксельних моделей.

Основна частина

Метод скінченних елементів (англ. Finite element method, FEM) є чисельним підходом для розв'язання диференціальних рівнянь, що описують фізичні явища в континуальних середовищах [1]. 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.

FEM може бути застосований у воксельній графіці шляхом розгляду кожного вокселя як елемента сітки [6].

Масово-пружні системи (англ. Mass-Spring Systems, MSS) моделюють об'єкти як набори масових точок (мас), з'єднаних між собою пружними елементами (пружинами) [2]. Цей метод дозволяє моделювати як пружні, так і пластичні деформації з відносно низькими обчислювальними витратами.

У воксельній графіці масово-пружні системи можуть бути ефективно застосовані шляхом представлення вокселів як масових точок [2].

Гідродинаміка згладжених частинок (ГЗЧ, англ. Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) – це безсітковий метод моделювання рідин та газів, де середовище представлено як набір частинок [4].

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 [4].

Таблиця 1 — 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 PIC (Particle-In-Cell), FLIP (Fluid-Implicit Particle), APIC (Affine Particle-In-Cell) та MPM (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) був розроблений для моделювання плазми та використовується для симуляції рідин і газів [5]. У PIC методі частинки несуть інформацію про масу, швидкість та інші властивості, тоді як вимірювання фізичних величин відбувається на фіксованій сітці (клітинках).

APIC може бути застосований для симуляції рідин та твердих тіл у воксельних середовищах з ще кращою точністю та стабільністю. Це особливо корисно при моделюванні складних взаємодій між рідинами та воксельними об'єктами [5]. Приклади візуалізації даних методів зображено на рис. 1.

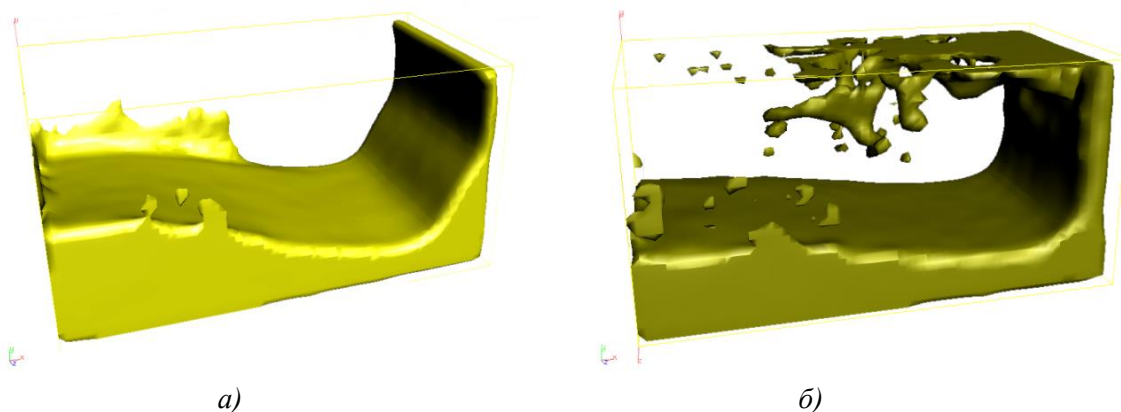


Рисунок 1 — Візуалізація симуляції за допомогою методів PIC (а) та FLIP (б)

Метод Affine Particle-In-Cell (APIC) є подальшим розвитком методів PIC та FLIP. Головною ідеєю є перенесення не лише скалярних величин, але й афінних моментів частинок до сітки [10], що покращує збереження кутового моменту і зменшує нумеричну дисипацію, що більше у порівнянні з методами PIC та FLIP покращує 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.

Висновки

Отримані результати свідчать про необхідність подальших досліджень у напрямку розробки гібридних моделей, які поєднують переваги як сіткових, так і частинкових підходів (наприклад, методи PIC, FLIP, APIC). Такий підхід може сприяти зменшенню чисельної дисипації та збереженню дрібних деталей потоку при моделюванні взаємодії рідких та твердих тіл.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. T. Pfaff, M. Fortunato, A. Sanchez-Gonzalez, 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>.
2. Y. Zhou, H. Lu, G. Wang, 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>.
3. 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.
4. L.L. Chang, 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>.
5. M. Müller, J. Stam, D. James, N. Thürey, "Real Time Physics: Class Notes," Siggraph Classes, no. 88, pp. 1-90, August. 2008, <https://doi.org/10.1145/1401132.1401245>.

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