

Аналіз та використання фізичних моделей для симуляції напружено-деформованого стану пористих середовищ в ігрових рушіях

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.085>

Віктор Биков

Національний університет водного господарства
та природокористування, НУВГП
Рівне, Україна
v.o.bykov@nuwm.edu.ua

Наталія Жуковська

Національний університет водного господарства
та природокористування, НУВГП
Рівне, Україна
n.a.zhukovska@nuwm.edu.ua

Анотація – В роботі розглянуто три фізичні моделі для симуляції напружено-деформованого стану пористих середовищ в ігрових рушіях. порівняння їх між собою, наведення переваг та недоліків кожного. Описано та наведено ймовірну реалізацію розглянутих методів за допомогою програмного коду.

Ключові слова —XPBD (Extended Position-Based Dynamics); MPM; Модель Біо (модель пороеластичності); Unity3D, Unreal Engine, симуляція; комп'ютерне моделювання; ігрові рушії.

I. ВСТУП

Відтворення достовірної симуляції напружено-деформованого стану пористих середовищ у реальному часі має дуже велике значення для будівельної інженерії, навчальної та науково-дослідницьких галузях. Також достовірність відтворюваності даних процесів можна використати у розважальних цілях, імплементувавши моделювання таких явищ у відеоігри за допомогою ігрових рушіїв та додаткових фізичних плагінів. Такий підхід значно посилить іммерсивний досвід гравця та виокремить даний продукт з поміж інших проєктів. Проте, реалізація комп'ютерного моделювання описаного явища потребує значних обчислювальних потужностей, і тому в даному випадку варто краще підійти до реалізації симуляції через вибір фізичної моделі та її реалізації за допомогою програмного коду та можливостей ігрових рушіїв з використанням фізичних плагінів. В роботі наведено три можливі реалізації комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану пористих середовищ, їх можлива реалізація, переваги та недоліки кожного з них.

II. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою та завданням дослідження даної роботи є наступне:

- Представити три фізичні моделі, за допомогою яких можна наочно представити симуляцію напружено-деформованого стану пористих середовищ через ігрові рушії.

- Описати наявні моделі та проаналізувати їх.
- Вивести переваги та недоліки кожної фізичної моделі.
- Обрати найбільш точну модель для подальшої розробки симуляції напружено-деформованого стану пористих середовищ в обраному ігровому рушії.

III. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Для симуляції напружено-деформованого стану пористих середовищ в ігрових рушіях потрібна фізична модель, яка буде опрацьовувати вхідні параметри та відобразити в реальному часі результати природних процесів через візуальне зображення, виведене з ігрового рушія. Для цієї реалізації було вибрано три моделі з різними рівнями достовірного фізичного представлення, а саме: метод частинок, MPM (Material Point Method) / APIC(Affine Particle-In-Cell), SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) [3][4]; XPBD (Extended Position-Based Dynamics) / PD (Projective Dynamics) [5]; модель Біо (модель пороеластичності) [1].

Дані моделі були обрані як оптимальні варіанти для реалізації відтворення вищеописаних процесів, які мають максимальну точність у відтворюванні фізичних явищ в пористих середовищах [7]. Проаналізуємо кожну з моделей.

1) *Метод частинок, MPM (Material Point Method) / APIC(Affine Particle-In-Cell), SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)*: моделювання твердих, сипучих тіл або рідин, де основним обчислювальними одиницями є частинки, а не вузлові сітки, які представлені у класичних методах як FEM (Finite Element Method) чи FVM (Finite Volume Method). Метод та його розширення моделюють тверде або пружне середовище як набір частинок, які зберігають свою сукупність, масу, деформацію та швидкість. Обчислення сил та зміщень представлені на тимчасовій сітці. Для рідкої фази використовується SPH, де рідину представляють як сукупність частинок, які взаємодіють через згладжені ядра. Перевагою

такого методу можуть бути висока фізична точність, може моделювати великі деформації, обвали, витікання рідин з твердих середовищ [3]. Даний метод не потребує фіксованої сітки, тобто він є стійким до топологічних змін. Також цей підхід є універсальним, оскільки можна описати разом тверді, сипучі та рідкі тіла, які опрацьовуються в симуляції. Щодо недоліків, то тут можна вказати наступне: часовий крок симуляції доволі обмежений і не є стабільним, бо зав'язаний умовою Куранта-Фрідрікса-Леві [4]. Калібрування симуляційних явищ даним методом є важким. Тому динамічно міняти параметри складно та доволі ресурсомістко (потрібні великі об'єми обчислювальної потужності CPU та GPU ресурсів) [6]. Також недоліком є складність інтеграції в ігровий рушій (наприклад, Unity, Unreal), через те, що для того, щоб імплементувати його, потрібні фізичні бібліотеки по типу Taichi, Flex або Houdini. Підсумовуючи все вище описане, можна сказати, що даний метод є найточнішим методом, але дуже складний для реалізації моделювання в реальному часі [7].

2) *XPBD (Extended Position-Based Dynamics) / PD (Projective Dynamics)*: методи, орієнтовані під реальний час і які моделюють фізичні явища за допомогою геометричних обмежень, а не через класичні рівняння руху рідин. Тверда фаза описується як система точок з обмеженням на об'єм і форму, а порове середовище моделюється через спрощене рівняння дифузії тиску [5]. Перевагами даного методу є саме те, що він є швидким та стабільним під час симуляції напружено-деформованого стану в реальному часі, простіший в інтеграції в ігрові рушії без залучення фізичних плагінів. В плані ресурсності в процесі обчислень не потребує значних потужностей CPU або GPU [6]. До недоліків даного методу можна віднести те, що фізичний процес є дещо спрощеним та наближеним до реальних показників, даний метод не враховує всіх нюансів процесу руху рідин через пористі середовища [7]. Також цей метод не надає точних напружень, а тільки демонструє геометричну поведінку. Таким чином, описаний метод краще підійде для розважальних цілей, де результат симуляції буде швидко опрацьовано та продемонстровано візуально, але точність та достовірність таких симуляцій не є фізично вірною.

3) *Модель Біо (модель пороеластичності)*: механіко-математична модель пористого середовища, що поєднує рівняння пружності твердої фази з рівнянням фільтрації рідини (Дарсі) [1]. Вона описує взаємодію рідинного тиску й деформацій каркасу беручи за основу параметри фізичних явищ (модуль Юнга, проникності тощо). Перевагою даного методу є висока точність моделі, порівняно з першим методом [2]. Дана модель враховує велику кількість фізичних параметрів при симуляції, що дає змогу налаштовувати симуляційні процеси гнучкіше та точніше [7]. До недоліків

використання можна віднести те, що даний метод є складним для обчислень. Це в свою чергу додасть складнощів реалізувати його в ігрових рушіях, навіть при підключених фізичних плагінах. Також цей метод не підходить для симуляції в реальному часі. Таким чином, даний метод не є пріоритетним при виборі моделі для інтегрування в наявні на сьогодні ігрові рушії.

IV. ОБМЕЖЕННЯ

Всі вищеописані методи мають ряд обмежень, які суттєво можуть вплинути на подальший розвиток наукової роботи. В цьому випадку це потреба в дорогому обладнанні для обчислень симуляції напружено-деформованого стану пористих середовищ у реальному часі. Також існує проблема в складній реалізації інтегрування змодельованих процесів в ігровий рушій через програмний код, оскільки дана реалізація потребує значних навичок та знань для підходів розробки та дизайну програмного коду симуляції фізичних явищ.

V. ВИСНОВКИ

Симуляція напружено-деформованого стану пористих середовищ в ігрових рушіях можна відтворити багатьма варіантами фізичних моделей. Однак, всі вони, особливо ті, які перераховані в даній роботі, не є ідеальними, адже мають ряд обмежень, як в перспективі технічної реалізації, так і правдивість відтворювання фізичних явищ. Проте, навіть при таких обмеженнях даний напрям в реалізації є перспективним, що може значно вплинути на будівельну, навчальну та науково-дослідницьку галузі. Після огляду та аналізу вищеописаних моделей для подальшої наукової роботи з реалізації симуляції напружено-деформованого стану пористих середовищ в ігрових рушіях в реальному часі було прийнято обрати реалізацію через метод частинок MPM/APIC, SPH, оскільки він є компромісним з поміж всіх описаних, має певну точність у відтворюванні фізичних явищ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Biot, M. A. General theory of three-dimensional consolidation / Journal of Applied Physics, 1941. 155–164 c.
- [2] Biot, M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range / The Journal of the Acoustical Society of America, 1956. 168–178 c.
- [3] Monaghan, J. J. Smoothed particle hydrodynamics / Reports on Progress in Physics, 1992. 1557–1571 c.
- [4] Bender, J.; Koschier, D.; Teschner, M. Divergence-free Smoothed Particle Hydrodynamics / ACM Transactions on Graphics (TOG), 2020. 97 c.
- [5] Macklin, M.; Müller, M. XPBD: Position-Based Simulation of Compliant Constrained Dynamics / Proceedings of the ACM SIGGRAPH Motion in Games, 2016. 49–54 c.
- [6] Müller, M.; Heidelberger, B.; Hennix, M.; Ratcliff, J. Position Based Dynamics / Journal of Visual Communication and Image Representation, 2007. 109–118 c.
- [7] Nehme, H.; Bender, J.; Koschier, D. Real-time simulation of porous deformable objects using particle-grid hybrids / Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, 2023. 1–10 c.