

К.ф.-м.н., доцент Нещадим О.М., магістрант Седухіна А.Д.

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

СПОСІБ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ СИМУЛЯЦІЇ РІДИН В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Abstract

Oleksandr Neshchadym, PhD., Associate Professor ; Alina Sedukhina, student
Method and Software for Real-Time Fluid Simulation

This paper is focused on modern methods for Real-Time Fluid Simulation. Latest methods were analyzed to find potential points for enhancement. Based on them modification was suggested. Modification is improving real-time fluid simulation methods by adding conditionally activated density correction layer.

Вступ

Вже щонайменше півстоліття активно триває розвиток симуляції реальних об'єктів у віртуальному середовищі. Однією з найбільш актуальних та складних задач у цій галузі є симуляція рідин. Технології цієї галузі знаходять застосування у різноманітних сферах. Зокрема, індустріях кіно та анімації, ігровій індустрії, та фізичні симуляції для науки та практичних задач інженерії. Особливо актуальною проблема стала з поширенням використання VFX в індустрії розваг, зокрема в кіно та відеоіграх. Але повний розрахунок поведінки потоків рідини в загальному випадку вимагає розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса [1], що є однією з відкритих проблем тисячоріччя, а отже станом на сьогодні не має єдиного розв'язку та навіть не доведено його існування. Тому якісні апроксимації є надзвичайно важливими та наразі залишаються єдиним практичним засобом симуляції рідин.

Наразі, найбільш поширеними методами апроксимації рівнянь Нав'є-Стокса для симуляції рідин в реальному часі є методи Лагранжа або гібридні методи. Серед них більш реалістичних результатів досягають гібридні методи.

Постановка задачі

Метою даної роботи є підвищення ефективності симуляції рідин в реальному часі шляхом поєднання існуючих сучасних методів. Для

досягнення поставленої мети було виокремлено та вирішено такі завдання: аналіз існуючих методів симуляції рідин, вибір методу для модифікації, висунуто ідею модифікації, обрано інструменти для розроблення програмної реалізації методу, імплементовано програмну реалізацію методу, протестовано роботу висунутої модифікації, проаналізовано первинні результати.

Аналіз наявних методів та алгоритмів

Незважаючи на варіацію конкретних методів та способів симуляції рідин, у загальному випадку їх можливо згрупувати у чотири категорії.

1. Методи Лагранжа, або методи на основі частинок.
2. Методи Ейлера, або методи на основі сітки.
3. Гібридні методи.
4. Методи з використанням штучного інтелекту.

При цьому, перші три з них є тісно пов'язаними між собою, тоді як четверта сформувалась порівняно нещодавно, коли у світі виник тренд на розвиток штучного інтелекту.

Перші методи прості в реалізації та легко підлаштовуються під складні поверхні, але для реалістичного результату потребують багато ресурсів [2].

Другі є гарним рішенням для великих об'ємів рідини, а на малих втрачають деталі, або потребують значних ресурсів для обчислення [3].

Гібридні методи, стабілізують частинки за внаслідок операцій на сітці та зберігають деталі за рахунок частинок. Додаткова складність реалізації полягає в постійному переході, проте більш якісний результат [4].

Четверті методи наразі нові та нестабільні. Автономні моделі використовують у обмеженій кількості галузей і вони непридатні для симуляцій за важливої точності.

Серед виділених груп гібридні методи наразі є найбільш збалансованими між швидкістю та якістю [3], тому саме їх було обрано для спроби подальшого покращення. Ця група методів поєднує принципи Ейлера та Лагранжа і на кожній ітерації одночасно працює як з сіткою, так і з частинками. За загальним принципом всі обчислення кінематики проводяться на частинках, а динаміка – на сітці. Отримані дані на кожному кроці передаються між ними.

Запропонований метод

Обраний метод належить до групи гібридних методів симуляції рідин. Основною відмінністю запропонованого методу від класичних методів, таких як FLIP та APIC є введення додаткового механізму корекції, що базується на врахуванні густини частинок у кожній клітині сітки. В

загальному випадку вважається, що рідина не стискується, і густина є константою. В разі рідин, яким притаманне стискання, виникає необхідність у додаткових мірах корекції. Такою мірою може стати додаткове обчислення густини і корекція положень та швидкостей сітки згідно отриманих значень [5]. З метою зменшення затрат ресурсів доцільно ввести адаптивний поріг необхідності обчислення шару густини. Для забезпечення роботи подібної симуляції в реальному часі в даній роботі запропоновано наступні кроки.

- Адаптивна активація корекції густини. Цей етап активується лише за наявності високонавантажених областей з високою щільністю частинок, що дозволяє уникнути зайвих обчислень.
- Використання паралельних обчислень.

Для реалізації такого підходу з сітки разом із швидкістю обчислюється маса, за допомогою якої визначається густина за формулою:

$$\rho_i = \frac{\sum p m_p}{V_i}. \quad (1)$$

Потім оцінюється необхідність корекції густини. Поріг корекції густини обирається адаптивно з урахуванням об'єму клітини, кількості частинок у ній та відносної похибки густини. Застосування такого порогу враховує дискретність представлення рідини та забезпечує уникнення зайвих обчислень. На підставі отриманого значення приймається рішення щодо необхідності розв'язання рівняння корекції густини. Розв'язок такого рівняння шукається чисельними методами, а потім корегується положення частинок. Після цього продовжується корекція швидкостей частинок.

Інструменти програмної реалізації

Для реалізації системи було використано мову C++ та рушій Unreal Engine. C++ забезпечує прямий контроль над пам'яттю та обчисленнями, що важливо для фізичних симуляцій, орієнтованих на роботу в реальному часі, тоді як Unreal Engine надає розвинену екосистему, інструменти рендерингу та широкі можливості інтеграції з ігровими та візуальними проєктами. Обраний формат реалізації у вигляді плагіну дозволяє досягти максимальної гнучкості – симуляцію можна легко вбудувати у різні проєкти, модифікувати та розширювати без зміни ядра рушія. Крім того, використання плагіну забезпечує доступ до широкої аудиторії розробників, включаючи користувачів, які не працюють безпосередньо з C++, але можуть взаємодіяти із системою через Blueprints і стандартні інструменти Unreal Engine. Такий підхід робить рішення універсальним та практичним з точки зору інтеграції в сучасні застосунки.

Тестування та аналіз отриманих результатів досліджень

Первинне тестування включає в себе порівняння швидкості видачі кадру симуляції. Для цього було обрано ситуацію, коли частинки сконцентровані в одному місці. Це вид ситуацій, з якими не може впоратись FLIP. Також було виміряно час роботи при відсутності та наявності порогу.

Параметри симуляції: 120 000 частинок, вага частинки 0.07, розмір сітки $25 \times 25 \times 25$, розмір клітини сітки 1.

Вигляд симуляції на початку роботи та через деякий час після корекції густини (Рис. 1).

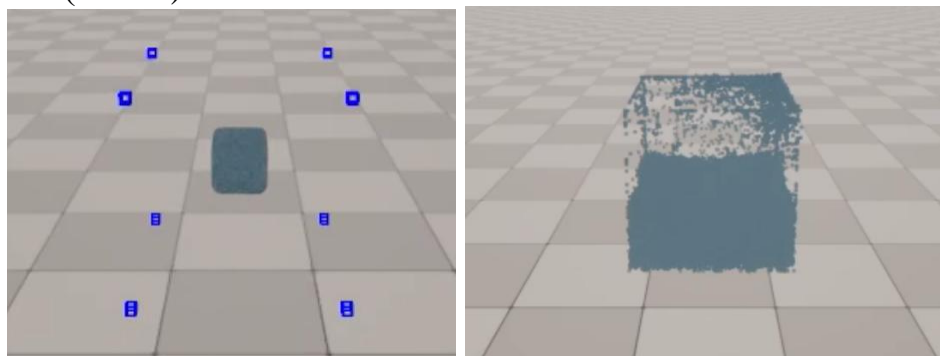


Рис. 1. Результат симуляції

Видно, що з часом, частинки поступово вирівнюються.

Таблиця 1.

Порівняння швидкості роботи симуляції при доданні порогу та без нього

	Поріг відключено	Адаптивний поріг $\alpha = 0.8, \beta = 0.2$
Середній час видачі кадру	0.0451	0.0357

Отримані значення свідчать, що введення порогу призвело до пришвидшення симуляції на 20.84% , що є важливим часом для такого типу симуляцій.

Висновки

В даній роботі проаналізовано сучасні методи симуляції рідин. Виділено їх переваги і недоліки та висунуто ідеї для покращення симуляції рідин гібридним методом, з використанням сітки та частинок. На основі цих ідей розроблено спосіб симуляції рідин, що покращує існуючий спосіб симуляції рідин в реальному часі.

Література

1. Stam, J. *Stable Fluids* // SIGGRAPH: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 1999. – P. 121-128.
2. Muller, M., Charypar, D. & Gross, M. *Particle-based fluid simulation for interactive applications*// Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation. – 2003.– P. 154-159.
3. Zhu, Y., Bridson, R. *Animating Sand as a Fluid* // ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH). – 2005. – Vol. 24, № 3. – P. 965 - 972.
4. Bridson, R. *Fluid Simulation for Computer Graphics* // A K Peters/CRC Press. – 2008.
5. Kugelstadt, T. *Implicit Density Projection for Volume Conserving Liquids*// IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2019. – P. 2385 - 2395.