

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Кузьмича Валентина Анатолійовича

на тему «Методи та засоби математичного моделювання руху рідин з

використанням машинного навчання»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 12 Інформаційні технології

за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія

Актуальність теми дисертації.

Актуальність застосування машинного навчання у моделюванні фізичних процесів визначається необхідністю зрозуміти та передбачити поведінку складних систем у різних галузях науки та техніки. Цей підхід передбачає розробку математичних моделей та рівнянь, які відображають динаміку цих систем, сприяючи глибокому аналізу їхніх властивостей. Однією з таких ключових областей застосування є моделювання руху рідин, де обчислювальна гідромеханіка відіграє важливу роль у чисельному аналізі рідинних потоків за допомогою числових розв'язків рівнянь Нав'є-Стокса. Втім, ці методи мають свої обмеження, такі як висока обчислювальна складність, що може стати проблемою при великомасштабних моделях чи в режимі реального часу. Альтернативою чисельним методам є використання решітчастих моделей Больцмана для моделювання руху рідин. Незважаючи на перспективність цього підходу, для нестисливих рідин виникають певні труднощі, які можуть бути подолані за допомогою дворівневих схем. Останнім часом спостерігається зростаючий інтерес до використання машинного навчання для моделювання руху рідин. Це зумовлено здатністю машинного навчання ефективно прискорювати процес моделювання порівняно із традиційними числовими методами, використанням оптимізованих обчислювальних архітектур, таких як графічні процесори (GPU) чи спеціалізоване апаратне забезпечення. Дослідження впливу різних типів апаратного забезпечення на швидкість моделювання фізичних процесів з допомогою машинного навчання є недостатньо дослідженою темою, що додатково підкреслює актуальність теми дисертації.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

– запропоновано дворівневий метод моделювання руху рідини за допомогою решітчастої моделі Больцмана і згорткової нейронної мережі, що використовується для уточнення значень поля швидкостей на основі

моделювання розв'язку рівняння Пуассона, який відрізняється від відомих методів тим, що зменшує час моделювання;

- набув подальшого розвитку метод решітчастої моделі Больцмана за рахунок методу розпаралелювання на основі підходу domain decomposition та використання модифікованої рівноважної функції розподілу на основі мінімізації дискретної ентропії, яка відрізняється від відомих методів кращою безумовною лінійною стабільністю моделювання;

- набув подальшого розвитку метод моделювання розв'язку рівняння Пуассона для отримання розподілу тиску з подальшим його використанням для корекції поля швидкості при моделюванні нестисливих рідин, на основі модифікованої нейронної мережі, що враховує геометрію обчислювального простору, який відрізняється від відомих методів можливістю обробки складних обчислювальних областей та меншим часом обчислення;

- запропоновано адаптацію дворівневого методу моделювання руху рідини для використання на спеціальному обчислювальному пристрої, яка відрізняється тим, що забезпечує прискорення обчислень для розробленої нейронної мережі при моделюванні розв'язку крайової задачі на основі рівняння Пуассона для тиску.

Автор впевнено використовує складний математичний апарат диференціальних рівнянь, числові методи пошуку розв'язку крайової задачі та технології апаратних прискорювачів. Основним науковим результатом здобувача є адаптація дворівневого методу моделювання руху рідини для реалізації його на спеціальному обчислювальному пристрої, що прискорює обчислення моделі. Основним практичним результатом є розроблене автором програмне забезпечення моделювання руху рідини дворівневим методом LBM, що за результатами експериментального дослідження прискорює обчислення у 13 разів та 6 разів при використанні нейронного процесора (NPU) та графічного процесора (GPU) відповідно.

Достовірність та обґрунтованість отриманих наукових результатів дослідження забезпечується теоретичним обґрунтуванням запропонованих методів та експериментальним дослідженням.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі обчислювальної техніки КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках договору від 14.02.2023 №0123U101109, який укладений у рамках робіт за грантом НАТО “Наука заради миру та безпеки”.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання зменшення часу моделювання дворівневим методом моделювання руху нестисливої рідини на основі решітчастої моделі Больцмана та згорткової нейронної мережі виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Кузьмича Валентина Анатолійовича повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності «123 – Комп'ютерна інженерія» та напрямам досліджень відповідно до освітньої програми «Комп'ютерна інженерія».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Методи та програмно-апаратні засоби моделювання руху рідин».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Кузьмича Валентина Анатолійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Виявлений відсоток співпадинь пояснюється здебільшого типовими фрагментами програмного коду з розробки інтерфейсу користувача. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою, складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 213 сторінок.

Текст дисертації викладений логічно та послідовно, його оформлення, в основному, відповідає чинним вимогам. Автор дотримується наукового стилю та використовує загальноприйняту термінологію.

У вступі розглядається актуальність дисертаційного дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Формулюється мета, завдання, об'єкт та предмет дослідження, наукова та практична новизна отриманих результатів. Приводяться відомості про особистий внесок здобувача та апробацію результатів дисертації.

У першому розділі представлений огляд наукової літератури присвяченої моделюванню руху рідин. Описано різні методи, зокрема ті, що використовують рівняння Нав'є-Стокса, LBM та машинне навчання. Проведено детальний огляд їх історичного розвитку та визначено загальні переваги та недоліки. Також вивчено літературу щодо розв'язання рівняння Пуассона. Аналіз результатів першого розділу призвів до формулювання задачі дисертаційного дослідження – розробити дворівневий метод моделювання руху рідини на основі LBM та машинного навчання.

У другому розділі детально описано решітчасту модель Больцмана, висвітлено її роль у контексті рівнів абстракції опису рідини та теоретично

обґрунтовано можливість застосування методу LBM для ефективного моделювання руху рідин. Розглянуті та розповіді про найбільш поширені чисельні схеми, висвітлені механізми встановлення початкових та граничних умов у методі LBM. Приділена увага особливостям встановлення притоку та витоку рідини, умов зворотного відображення, які імітують взаємодію потоку рідини з твердим тілом. Проведено опис модифікованої рівноважної функції розподілу, заснованої на мінімізації дискретної ентропії, що гарантує безумовну лінійну стабільність моделювання. Виділено значення уточнення поля швидкості за допомогою рівняння Пуассона для тиску при моделюванні руху нестисливих рідин методом LBM.

У третьому розділі дисертації розглянуто використання нейронних мереж для моделювання розв'язку крайової задачі на основі рівняння Пуассона. Виділено переваги нейронних мереж у заданні складних функцій порівняно з традиційними методами. Описано також ітераційні чисельні методи для розв'язання систем алгебраїчних рівнянь, які використовуються для генерації навчальних та тестових датасетів для нейронних мереж. Розглянуті різні шари та функції активації у штучних нейронних мережах для досягнення поставлених завдань.

У четвертому розділі дисертації представлений дворівневий метод моделювання руху рідини, що використовує решітчасту модель Больцмана та згорткову нейронну мережу. Описана структура нейронної мережі для моделювання розв'язку крайової задачі на основі рівняння Пуассона. Розроблено докладний алгоритм дворівневого методу, який включає модифіковану рівноважну функцію розподілу. Також створено паралельний алгоритм domain decomposition та оптимізовано нейронну мережу для ефективного використання апаратних прискорювачів NPU. Для тестування використано розроблене програмне забезпечення.

У п'ятому розділі дисертації здійснені експерименти по моделюванню руху рідин з використанням розробленого дворівневого методу. Результати експериментів підтверджують ефективність методу у забезпеченні нестисливості рідини у порівнянні зі звичайним методом LBM. Детально вивчена точність нейронної мережі в порівнянні з чисельним методом, а також виявлена взаємна відповідність між ними. Проведений аналіз обчислювальної швидкості розробленого методу та впливу використання різних апаратних прискорювачів на швидкість обчислень.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 8 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 1 стаття у науковому виданні, включеному на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 3 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus.

Також результати дисертації були апробовані на 4 наукових фахових конференціях.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Модифікований метод LBM (Lattice Boltzmann Method), наведений у розділі 4, використовується для отримання даних для навчання нейромережі. Але він дає наближений розв'язок. На мою думку, було б доцільно визначати якість пропонованого розв'язку, підставляючи його у рівняння, тоді це було б навчання з точним розв'язком і підвищувало точність.

2. Візуальне порівняння, використане для аналізу поля швидкості руху рідини (підрозділ 5.4), не може бути точним. Потрібно оцінювати результати за кількісною ознакою.

3. Додавання до лістингу коду фрагментів з розробки користувацького інтерфейсу не є доцільним, оскільки він не містить ані науковий результати, ані практичний результат дисертаційного дослідження.

4. Зауваження до оформлення роботи:

- метод моделювання розв'язку – незрозумілий і, здається, неправильний термін. Моделювання розв'язку (solution modeling) – це представлення розв'язку у вигляді діаграм, символів або нотацій.
- дисертація (розділи 2 та 3) містить забагато детального опису відомих методів з розв'язку крайової задачі, які можна було згадати тільки з наведенням відповідних посилань, а сконцентрувати увагу в тексті на викладенні результатів власного наукового дослідження;
- в анотації чітко не зазначений науковий результат роботи та її практичне значення;
- знаки пунктуації після формул пропущені.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Кузьмича Валентина Анатолійовича на тему «Методи та засоби математичного моделювання руху рідин з використанням машинного навчання» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для «Інформаційні технології». Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Кузьмич Валентин Анатолійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Рецензент:

професор кафедри
інформатики та програмної інженерії
КПІ ім. Ігоря Сікорського,
доктор технічних наук, професор



М.П.

« 18 » 01 2024 року