

ДИНАМІЧНЕ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПІДРАХУНОК ОБ'ЄМУ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПОВЕРХНЯХ РІЗНОГО ТИПУ

Подано інструмент динамічного 3D-розподілу сипких речовин підрахунку об'єму при параболічній апроксимації CSV даних чисельного інтегрування з векторним відображенням.

Ключові слова: динамічне 3D-моделювання, сипкі речовини, параболічна апроксимація, CSV-імпорт, чисельне інтегрування, векторне відображення, науково-промислові задачі.

Сучасні наукові та прикладні задачі, пов'язані з виміром та підрахунком кількості речовини сипких матеріалів. Точне моделювання форми їх розподілу та потреба підрахунку об'єму насипних форм з поверхнею різної складності спостерігається у різних галузях людської діяльності від будівництва та гірничої справи, сільського господарства та екологічного моніторингу. Необхідність у інструментах підрахунку, здатних адаптуватися до нестандартних форм і забезпечувати швидкі обчислення, стає все більш очевидною. Існуючі рішення часто обмежені або високими вимогами до обчислювальних ресурсів, або жорсткими рамками застосування, що ускладнює їх використання в умовах реальних проєктів. Метою даної роботи є розробка програмного інструменту, який поєднує гнучкість роботи з даними, високу точність обчислень та інтерактивну візуалізацію, що робитиме його універсальним для різноманітних наукових і промислових завдань.

Дослідження спирається на фундаментальні принципи теорії складних систем та нелінійної динаміки, які вивчають колективну поведінку взаємодіючих компонентів [1]. Сипкі матеріали, як об'єкт дослідження, є типовими представниками таких систем, як окремі частинки, підкоряючись простим законам тертя та гравітації, формують макроструктури з властивостями, що не зводяться до їхніх індивідуальних характеристик. Це явище, відоме як самоорганізація, аналогічне процесам у фізиці конденсованих середовищ, де локальні взаємодії призводять до глобальних фазових переходів, раптових змін стану системи, таких як кристалізація або ущільнення. Параболічна апроксимація, використана в моделюванні, відіграє роль математичного каркасу, який балансує між двома протилежними тенденціями. Випадковістю, пов'язаною з хаотичним рухом частинок, та енергетичною ефективністю, що сприяє утворенню стабільних конфігурацій. Цей підхід дозволяє відтворити як статичні форми, так і динамічні процеси, такі як насипання матеріалу, ґрунтуючись на принципі масштабної інваріантності, де одні й ті ж закони діють на різних рівнях системи, від мікроскопічних частинок до макроскопічних структур.

Наукові дослідження в галузі моделювання сипких матеріалів охоплюють різноманітні методичні підходи. Так, методи, засновані на дискретних елементах, забезпечують високу точність за рахунок деталізованого аналізу окремих частинок, проте їх застосування обмежене через значні вимоги до обчислювальних ресурсів, особливо для масштабних задач [1]. Інші підходи, такі як статистичні моделі, пропонують спрощені рішення, але часто не враховують локальні геометричні особливості поверхонь, що знижує їх практичну цінність для складних сценаріїв. У цьому контексті параболічна апроксимація розглядається як перспективний компромісний варіант, оскільки вона дозволяє досягти балансу між точністю та ефективністю обчислень. Однак навіть такі методи часто мають обмеження, зокрема відсутність підтримки імпорту довільних геометрій для відображення форм, що ускладнює їх використання в реальних умовах, де критичною є адаптація до нестандартних поверхонь.

Основу роботи складає алгоритм, що інтегрує три взаємопов'язані компоненти. Це імпорт геометричних даних, генерацію моделі шару сипкого матеріалу та чисельний підрахунок об'єму. На першому етапі користувач завантажує CSV-файл, що містить координати поверхні у форматі (x, y, z), де кожен рядок відповідає точці просторової сітки. Програмний інструмент автоматично виконує підготовку даних, який визначає мінімальні та максимальні значення координат для визначення меж об'єкта, нормалізує дані та генерує рівномірну сітку з кроком, що становить 10% від загальної довжини та ширини поверхні. Цей крок обрано емпірично для забезпечення балансу між точністю та ефективністю. Сітка формується за допомогою функцій бібліотеки NumPy, що забезпечує векторизоване створення вузлів із подальшим інтерполюванням значень для заповнення пропусків у вхідних даних.

Генерація шару сипкого матеріалу, як показано на рис. 1, ґрунтується на параболічній апроксимації висоти, що моделює природний розподіл матеріалів із куполоподібним профілем. Висота шару визначається

як функція, яка досягає максимуму в центрі поверхні та спадає до її країв. Коефіцієнт розподілу та параметри анізотропії враховують геометричні особливості поверхні, такі як її форма, орієнтація та топографічні нерівності [2]. Для кожного вузла сітки обчислюється локальна висота, що дозволяє імітувати реальну поведінку сипких матеріалів, зокрема формування конусів обсипання, і адаптувати модель до різноманітних геометрій, від плоских платформ до складних багатовимірних структур.

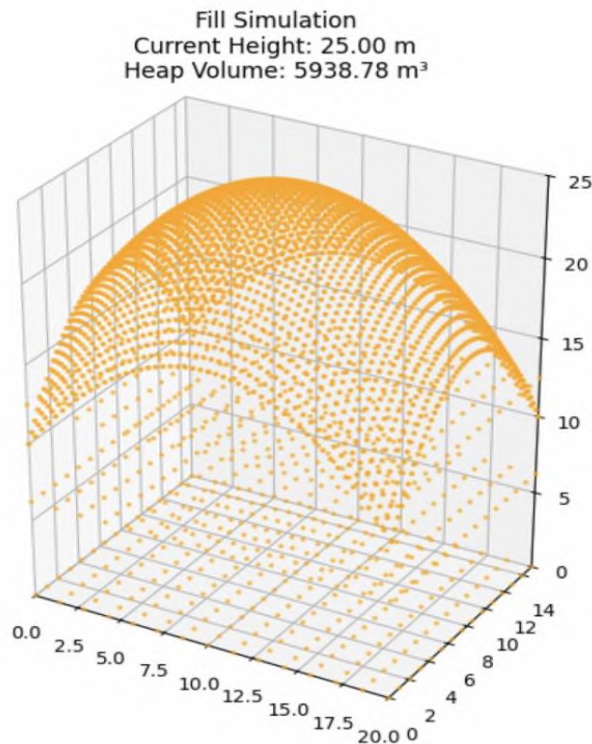


Рисунок 1 – Генерація шару сипучого матеріалу

Чисельний підрахунок об'єму реалізовано за методом прямокутників, де об'єм апроксимується сумою значень висоти в кожному вузлі сітки, помноженої на площу елементарної комірки. Для оптимізації обчислень використано векторизацію операцій засобами бібліотеки NumPy, що дозволило уникнути циклів на рівні інтерпретатора Python та зменшити час розрахунків у 5-7 разів порівняно з послідовними методами.

Важливим аспектом валідації стало порівняльне дослідження з альтернативними підходами [3]. Запропонована методика показала суттєве покращення точності розрахунків об'єму порівняно зі статистичними моделями, а також вищу ефективність обчислень у порівнянні з методами, що ґрунтуються на деталізованому аналізі окремих частинок. Зокрема, застосування алгоритму в задачах аналізу розподілу матеріалів сприяло оптимізації логістичних процесів шляхом виявлення зон нераціонального використання ресурсів та пропозиції альтернативних стратегій розміщення.

Таким чином, інструмент довів свою ефективність як для стандартних, так і для складних геометрій, що робить його універсальним рішенням для наукових та прикладних завдань, де точність обчислень поєднується з вимогами до гнучкості та швидкодії.

Отже, розроблений програмний інструмент для динамічного 3D-моделювання та підрахунку об'єму сипких матеріалів довів свою ефективність у широкому спектрі наукових і прикладних задач. На основі параболічної апроксимації вдалося створити модель, яка поєднує високу точність розрахунків із обчислювальною ефективністю, що є критичним для роботи зі складними геометріями. Алгоритм забезпечує гнучкість завдяки підтримці імпорту довільних поверхонь через CSV-дані, що дозволяє адаптуватися як до стандартних структур, так і до нерегулярних природних ландшафтів.

Висновки

Розроблена модель параболічної апроксимації та програмний інструмент демонструють здатність відтворювати не лише статичні форми 3D-розподілу сипких речовин, а й динамічні процеси, такі як насипання або перерозподіл матеріалів. Це відкриває нові можливості для застосування інструменту в галузях, де критичними є прогнозування змін у часі, наприклад, у екологічному моніторингу чи промисловій логістиці. Валідація на різних типах поверхонь підтвердила універсальність підходу, а порівняння з альтернативними методами виявило його переваги у балансі між точністю та швидкістю, утворює основу для розвитку методів моделювання складних систем та засобів виміру, демонструючи переваги комплексного поєднання теоретичних принципів нелінійної динаміки з сучасними обчислювальними технологіями для інновацій у технології виміру і контролю у промисловості.

References

1. Yunshandan W., Wenfu W., Kai C., Ji Z., Zhe L., Yaqiu Z. Progress and Prospective in the Development of Stored Grain Ecosystems in China: From Composition, Structure, and Smart Construction to Wisdom Methodology. Agriculture. 2023. P 6–10.
2. Fang Y., Chen Z., Wu L., Muhammad S., Zhou M., Yin J. Design and Experiments of a Convex Curved Surface Type Grain Yield Monitoring System. Electronics. 2024. 5 p.
3. Bazargani K., Deemyad. T. Automation's Impact on Agriculture: Opportunities, Challenges, and Economic Effects. Robotics. 2024. 19 p

DOI 10.34132/mspc2025.01.06.32

Alexander Trunov, Volodymyr Boiko

DYNAMIC 3D MODELING AND CALCULATION OF VOLUME OF BULK MATERIALS ON SURFACES OF VARIOUS TYPES

A tool for dynamic 3D distribution of bulk materials and volume calculation with parabolic approximation of CSV data of numerical integration with vector mapping is presented.

Keywords: *dynamic 3D modeling, bulk materials, parabolic approximation, CSV import, numerical integration, vector mapping, scientific and industrial problems.*

Відомості про автора / Information about the Author

Трунов Олександр, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: trunovalexandr@gmail.com.

Alexander Trunov, Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Faculty of Computer Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: trunovalexandr@gmail.com.

Бойко Володимир, студент спеціальності “Автоматизації, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка” факультету Комп'ютерних наук, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: vboyko333@gmail.com.

Boiko Volodymyr, student of the specialty “Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics” of the Faculty of Computer Sciences, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: vboyko333@gmail.com.

© О. Трунов, В. Бойко
20.05.2025.

Стаття отримана редакцією