

The simulation results reveal that the maximum time spent by the sub-system is 2.03 seconds for the RUDP protocol and 6.22 seconds for the TCP protocol. Therefore, RUDP is recommended for data transmission in the future. In the event of message loss, retransmission occurs exponentially, calculated using the proposed formula. If the initial transmission occurs immediately, subsequent times exponentially increase but remain collectively less than the transmission time for the TCP protocol.

Key words: *transmission protocol, RUDP, TCP, packet loss.*

Отримано: 04.01.2024

УДК 004.94:53.04:004.925

DOI: 10.32626/2308-5916.2024-25.106-113

О. С. Станіславів,

О. О. Жолтовський,

О. А. Смалько, канд. пед. наук

Кам'янець-Подільський національний університет
імені Івана Огієнка, м. Кам'янець-Подільський

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕЯКИХ ПРИРОДНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЛАНДШАФТІВ

У статті розглядаються різні підходи до формування рельєфних структур з натуралістичними формами, що є корисним для подальшого їх використання в ігровій індустрії, у середовищах розширеної реальності, для створення якісного, правдоподібного візуального контенту.

Дослідивши значну частину математичного інструментарію ландшафтоутворення, автори виділяють серед багатьох методів, заснованих на фізиці, опис таких природних процесів, як ерозія, седиментація, повзучість матеріалів, завдяки чому можна синтезувати реалістичний рельєф місцевості.

Деякі методи розв'язання задач чисельної гідроаеромеханіки зі спрощеними умовами є ефективними для моделювання різних особливостей ландшафту. Для синтезування крупних структур рельєфу, взявши за основу нестисливу нев'язку рідину, можна скористатися, наприклад, рівнянням Ейлера. Дрібніші ландшафтні компоненти можна формувати за допомогою рівнянь мілководдя. Їх же можна використовувати для моделювання ерозійних процесів, спричинених руйнуванням ґрунту або гірських порід водним потоком. За потреби симуляції ерозії русла річки варто застосовувати напівемпіричне сімейство рівнянь закону потужності потоку. Природних форм до рельєфу додасть також рівняння Бейтмана-Бюргерса, це допоможе змоделювати різні аспекти руху рідини, такі як течія в річках, морях, океанах та

хвильові явища. Нехтуючи членами, пов'язаними з в'язкістю, беручи за основу рідину з густиною, подібною до води, і тим самим спрощуючи обчислювальний процес, комплексну модель можна доповнити, застосовуючи рівняння Хопфа. Воно цілком підійде для опису простих хвильових процесів або лінійних особливостей ландшафту, наприклад, річок або гірських хребтів. Важливо лише навчитися знаходити баланс між прагненням до ідеальних ландшафтних структур і раціональним використанням обчислювальних ресурсів.

Ключові слова: *цифровий ландшафт, генерація рельєфу, процедурна генерація, методи на основі фізики.*

Вступ. Зростання обчислювальних потужностей комп'ютерної техніки поступово наближує представлення цифрового світу до реалістичності, що необхідно для повноцінного навчання, для покращення розуміння різних складних концепцій, для проведення важливих експериментів без ризику і витрат, для соціалізації та комунікації людей, їхнього психологічного й емоційного зростання, для формування деяких професійних навичок, розвитку творчості, уяви тощо. Користувачі нових візуальних медіа стають все більш вибагливими і цим постійно стимулюють удосконалення методів розробки реалістичних цифрових зображень, відеоігор, імерсивних технологій.

Постійно ведуться активні дослідження з метою вдосконалення способів генерації ландшафтів, завдяки яким створення потрібних об'єктів (текстур, форм рельєфу місцевості, рослинності, антропогенних елементів ландшафту та іншого його наповнення) відбувається з мінімальними вхідними даними [4]. Також розвиваються підходи, що ґрунтуються на використанні генеративних змагальних мереж [3], які допомагають генерувати ландшафти, спираючись на досвід, здобутий шляхом вивчення баз даних з реальними картами висот [5]. Але деякі спрощення одних прийомів і неконтрольованість інших залишає простір для експериментів ентузіастів, котрі інтуїтивно відчують необхідність наслідування досконалих природних явищ задля втілення реалістичних форм у штучних середовищах з якомога меншою обчислюваною складністю.

Метою статті є аналіз ефективних підходів до моделювання ландшафтів, які спираються на математичний опис природних явищ, завдяки чому можна синтезувати реалістичний візуальний контент.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під ландшафтом будемо розуміти візуальні особливості ділянок земної поверхні з певним сполученням природних компонентів та об'єктів, створених людьми. Важливим є пошук нових ефективних методів моделювання ландшафту, які би дозволили правдоподібно синтезувати різноманіт-

ні елементи геофізично визначених форм рельєфу, еквіваленти біомних елементів земного покриву та антропогенні об'єкти.

Завдання розробників полягає у пошуку алгоритмів процедурної та заснованої на фізиці генерації, що спираються на використання оптимальних математичних структур, за якими формується складний та об'ємний візуальний контент із збалансованою обчислювальною складністю і є достатньо реалістичним.

Серед різноманіття підходів, які наразі використовуються для генерації природних компонентів цифрових ландшафтів, варто досліджувати і вдосконалювати відомі та досить ефективні методи, що базуються на комбінації кількох хвильових функцій, різних шумів (градієнтного, фрактального, стільникового, симплекс-шуму тощо), різноманітних самоподібних структур. Змінюючи частоту й амплітуду хвиль, налаштовуючи параметри шуму встановленням потрібних початкових станів, додаванням різних ітерацій (октав), а також поєднуючи різні алгоритми, можна досягати бажаної лакунарності, яка дозволяє моделювати фракталоподібні обриси багатьох природних об'єктів і явищ (рис. 1).

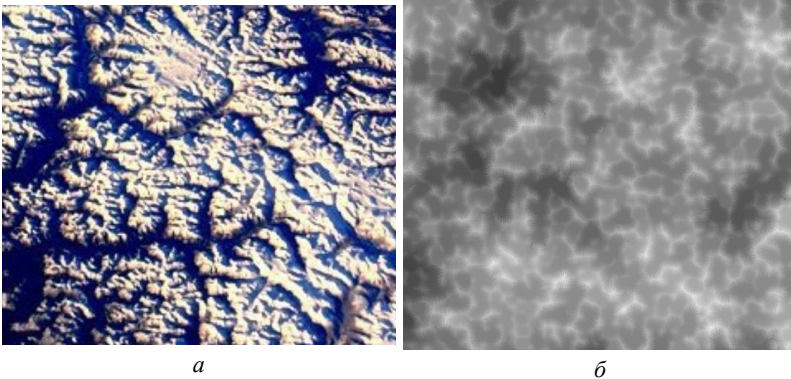


Рис. 1. Фракталоподібна геоморфологія гір і наближене її моделювання:
а – фрагмент світлини Канадських скелястих гір, зробленої з МКС астронавтом Скоттом Келлі; *б* – модель на основі шуму Перліна та симуляції дощової ерозії

Як правило, з використанням шумових функцій задається карта висот, при цьому тривіальні математичні підходи дозволяють утримувати значення у потрібних діапазонах залежно від визначеної геометрії цифрової місцевості. Нехитрі чисельні методи та операції, у тому числі згладжування, масштабування, додавання невеликого турбулентного збурення до значень висот допомагають сформувати основу для більш-менш природних краєвидів з багатими деталями (рис. 2).

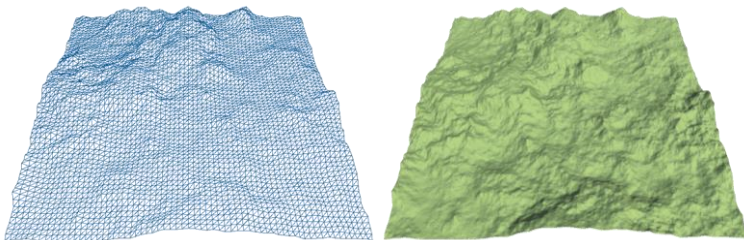


Рис. 2. Згенерований на основі карти висот деталізований рельєф місцевості

Досить цікавими для синтезування крупних структур рельєфу вбачаються деякі методи розв'язання задач чисельної гідроаеромеханіки. Дещо спрощуючи у процесі генерації ландшафту гідродинамічні параметри моделювання, беручи за основу нестисливу нев'язку рідину, можемо скористатися, наприклад, рівнянням Ейлера (1), до якого зводиться рівняння Нав'є-Стокса:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \end{cases}, \quad (1)$$

де $\bar{u}(x, y, t)$ та $\bar{v}(x, y, t)$ – значення швидкості у двох вимірах (x і y), ρ – щільність рідини, $\bar{p}(x, y, t)$ – середній тиск.

Дрібніші ландшафтні структури можна, скажімо, формувати з використанням моделей квазіодновимірних течій, які спостерігаються у довгих каналах, в затоках, прибережних зонах або у річках, що мають дуже малу ширину порівняно з довжиною. Рівняння, які описують такі течії, називаються рівняннями мілководдя або рівняннями Сен-Венана (2):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = g d \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}, \quad (2)$$

де g – гравітаційна стала, $h(x)$ – рівень води, $d(x)$ – глибина води. При цьому має місце рівність $h(x) = d(x) + b(x)$, де $b(x)$ – рівень дна [1]. Ці рівняння також можна застосовувати при моделюванні ерозійних процесів, спричинених руйнуванням ґрунту або гірських порід водним потоком, а тому вони є дуже корисними для додавання тонких натуралістичних нюансів до цілісної моделі ландшафту.

Переважно базовані на фізиці методи допомагають моделювати реалістичний рельєф, тому для цього значну користь надають математичні описи таких процесів, як седиментація, що завершується утворенням різних видів відкладів або наносів; різноманітних ерозій-

них явищ, зумовлених дією води, вітру, льоду (гідравлічної та гірської ерозії, ерозії донних осадів і скельних порід, дефляції, денудації тощо) і не менш важлива повзучість матеріалів (яку ще називають холодною текучістю), що обумовлює деформацію твердих речовин, швидкість котрої залежить від тривалості її дії, впливу температури та навантаження на матеріал. Лише врахування особливостей широкого спектру подібних явищ дозволяє синтезувати цифрові ландшафти, подібні до тих, що існують у реальному світі (рис. 3).



а



б

Рис. 3. а – фрагмент гористого рельєфу, згенерований з використанням складної моделі, в якій враховано накладання кількох геологічних процесів і деяких екзогенних факторів; б – схили лавиноподібних конусних гір геопарку Данься (Китай), утворені відкладами пісковика і червоного гравію, що піддавалися ерозійному вивітрюванню, розмиву і гравітаційному руйнуванню впродовж 24 млн років (джерело: <http://surl.li/pmyydd>).

З метою спрощення процесу прогнозування (а також моделювання) ерозії русла річки останнім часом почали застосовувати напівемпіричне сімейство рівнянь з умовною назвою «закон потужності потоку». Вони описують принцип збереження маси та імпульсу води у потоці, співвідношення гідравлічної геометрії русла (масштабування за шириною і швидкістю течії) та гідрологічні характеристики басейну (залежність витрат від площі), а також припускають залежність швидкості ерозії або від питомої потужності потоку, або від напруги зсуву в руслі. Закон потужності потоку фактично є прикладом рівняння адвекції, яке зазвичай використовується для моделювання розповсюдження імпульсів, що створюють розриви або перепади у річковому профілі [6].

Для формування рельєфних конструкцій з природними формами цілком можна використовувати і рівняння Бейтмана-Бюргерса, за допомогою якого моделюються різні аспекти руху рідини, такі як течія в річках, морях, океанах та хвильові явища. Застосовуючи такий математичний інструмент, можна моделювати нестабільні області в ландшафтах, які зазнають постійних змін під впливом зовнішніх факторів (тектонічні рухи, вітер або вплив води). Однак генерація структур рельєфу з різноманітними деталями на різних рівнях складності та масштабах потребуватиме значних обчислювальних ресурсів.

Якщо взяти за основу рідину з густиною, подібною до води, та відносно низькою в'язкістю, то можна використати рівняння нев'язкої рідини Бюргерса, яке описує динаміку швидкості потоку рідини. Воно формується шляхом нехтування членами, пов'язаними з в'язкістю, у вихідному рівнянні. Отримуємо таке диференціальне рівняння в частинних похідних, яке ще називають рівнянням Хопфа (3):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

де x – просторова координата, t – час, $u(x, t)$ – поле швидкості як функція положення x і часу t , $u \frac{\partial u}{\partial x}$ – член адвекції, який описує кон-

вективну течію рідини.

Це рівняння є квазілінійним гіперболічним рівнянням першого порядку. Воно цілком підходить для опису простих хвильових процесів або лінійних особливостей ландшафту (наприклад, річок або гірських хребтів).

Накладання на згенерований рельєф відповідних текстур та додавання біомних об'єктів значно наближає його до реального (рис. 4). Проте слід зауважити, що в межах даної роботи не ставилася задача урізноманітнення фітоценозу у цифрових ландшафтах, а також не вирішувались завдання створення реалістичної анімації руху води в межах змодельованих траєкторій річкових мереж, що являють собою дуже цікаві напрямки подальших досліджень.

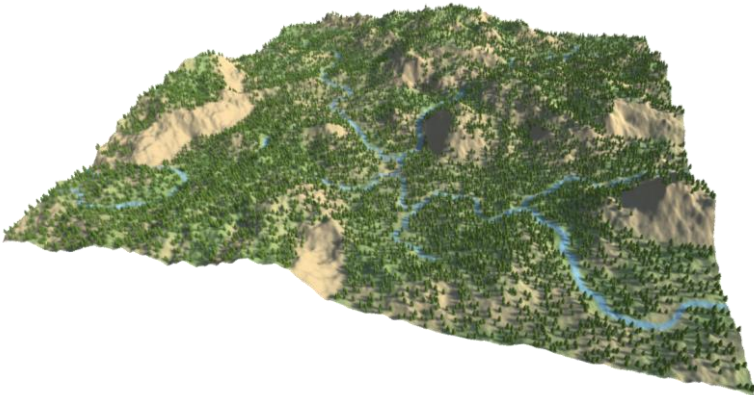


Рис. 4. Приклад ландшафту, створеного з використанням рівнянь, що описують деякі гідродинамічні явища

Хоч погано піддаються математичному опису певні геологічні процеси, такі як абразія, карстоутворення, тектонічні рухи, обвален-

ня, вулканізм, сейсмічні явища тощо, їх вплив на геоморфологію поверхні Землі також є значним, тому потрібно вишукувати методи візуальної імітації і подібних феноменів.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Генеровані цифрові ландшафти не повинні обмежуватися відображенням наслідків дій процесів, притаманних виключно нашій планеті. Активний розвиток імерсивних технологій диктує необхідність вивчення генезису й інших астрономічних об'єктів, принаймні Сонячної системи. Отже важливими є планетологічні розвідки, завдяки яким стануть відомими процеси походження, наприклад, такого неординарного явища, як хаотичний рельєф, що спостерігається на поверхні Марса (рис. 5), Меркурія, Плутона, Європи (супутника Юпітера) тощо.

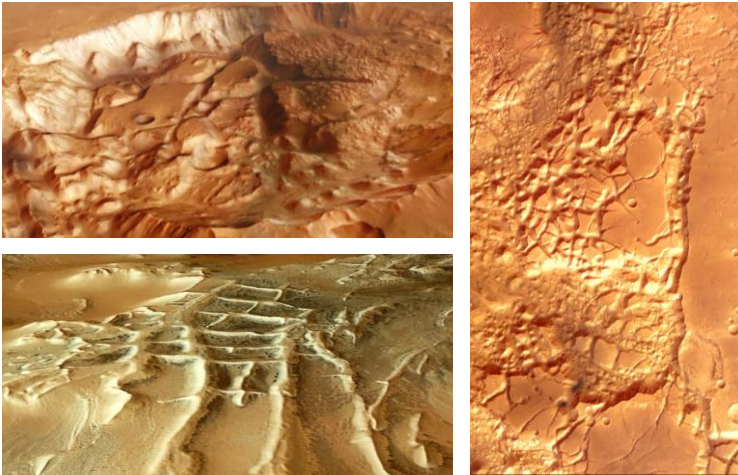


Рис. 5. Фрагменти моделей хаотичного рельєфу Марса, створені фахівцями ESA на основі світлин, отриманих орбітальним апаратом Mars Express

А тим часом продовжується вивчення математичного інструментарію ландшафтоутворення, досліджуються ефективні підходи до формування цифрових рельєфів і раціональні, виправдані на практиці моделі втілюються у розроблювальному програмному застосунку.

Список використаних джерел:

1. Beneš B. Real-time erosion using shallow water simulation. 4th Workshop in virtual reality interactions and physical simulation. VRIPHYS. *The Eurographics Association*, 2007. DOI: 10.2312/PE/vriphys/vriphys07/043-050.
2. Chen A., Darbon J., Buttazzo G., Santambrogio F., Morel J.-M. On the equations of landscape formation. *Interfaces and Free Boundaries*. 2014. Vol. 16. DOI: 10.4171/IFB/315.
3. Chakraborty T., Reddy K S U., Naik S. M., Panja M., Manvitha B. Ten years of generative adversarial nets (GANs): a survey of the state-of-the-art. *Ma-*

- chine Learning: Science and Technology*. 2024. Vol. 5. № 1. DOI: 10.1088/2632-2153/ad1f77.
4. Liu Y. An overview of procedurally generating virtual environments. *International Journal of Computer Science and Information Technology*. 2024. Vol. 2. № 1. DOI: 10.62051/ijcsit.v2n1.16.
 5. Spick R. R., Walker J. Realistic and textured terrain generation using GANs. *CYMP'19: European Conference on Visual Media Production*. 2019. DOI: 10.1145/3359998.3369407.
 6. Yuan X. P., Braun J., Guerit L., Rouby D., Cordonnier G. A new efficient method to solve the stream power law model taking into account sediment deposition. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2019. Vol. 124. № 6. DOI: 10.1029/2018JF004867.

COMPUTER MODELING OF SOME NATURE PROCESSES FOR LANDSCAPE GENERATION

The article describes various approaches to the formation of relief structures with naturalistic shapes, which is useful for their further use in the gaming industry, in augmented reality environments, and for creating high-quality, believable visual content.

Having studied a significant part of the mathematical tools for landscape formation, the authors distinguish among many physics-based methods the description of such natural processes as erosion, sedimentation, and creep of materials, which can be used to synthesize realistic terrain.

Some methods for solving numerical hydroaeromechanics tasks with simplified conditions are effective for modeling various landscape features. For example, the Euler equation can be used to synthesize large terrain structures based on an incompressible inviscid fluid. Smaller landscape components can be shaped using shallow water equations. They can also be used to model erosion processes caused by the destruction of soil or rocks by a water flow. If you need to simulate riverbed erosion, you should use a semi-empirical family of stream power law equations. The Bateman-Burgers equation will also add natural shapes to the terrain, which will help to model various aspects of fluid motion, such as flow in rivers, seas, oceans, and wave phenomena. By neglecting the viscosity-related terms, assuming a fluid with a density similar to water, and thus simplifying the computational process, a comprehensive model can be augmented by applying the Hopf equation. It is only important to manage the balance between the desire for ideal landscape structures and the rational use of computing resources.

Key words: *digital landscape, terrain generation, procedural generation, physics-based methods.*

Отримано: 28.07.2024