

УДК 378.147: 004.9

Моделирование динамических поверхностей**Simulation of dynamic surfaces****Кудж / Kudzh S.**Станислав Алексеевич
(rektor@mirea.ru)

доктор технических наук, профессор,
почетный работник науки и техники РФ,
действительный член Академии военных наук.
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический
университет» (РТУ МИРЭА),
ректор.
г. Москва

Цветков / Tsvetkov V.Виктор Яковлевич
(cvj2@mail.ru)

доктор технических наук, профессор,
действительный член РАЕ, РАКЦ, РАО,
лауреат премии Президента РФ в области
образования, лауреат премии Правительства РФ,
почетный работник ВПО РФ,
почетный работник науки и техники РФ.
РТУ МИРЭА,
профессор кафедры инструментального и
прикладного программного обеспечения.
г. Москва

Ключевые слова: трехмерная поверхность – 3D surface; генерация шума – noise generation; пикселизация – pixelization; вокселизация – voxelization; алгоритм генерации – generation algorithm; преобразование моделей – model transformation.

Предложен метод моделирования поверхностей на основе вокселей. Описаны методы создания поверхности с использованием воксельной технологии. Раскрывается содержание понятий: воксель, сид, волюметрическая информация. Описан механизм сглаживания поверхности и превращения ее из кубической в регулярную. Описаны три этапа генерации пространственных моделей с помощью алгоритма Marching Cubes. Статья содержит результаты эксперимента по генерации поверхности.

A method for modeling surfaces based on voxels is proposed. Methods for creating a surface using voxel technology are described. The content of the concepts is revealed: voxel, seed, volumetric information. The mechanism of surface smoothing and its transformation from cubic to regular is described. Three stages of generating spatial models using the Marching Cubes algorithm are described. The article contains the results of an experiment on surface generation.

Введение

Моделирование поверхности обычно связывают с цифровой моделью поверхности или цифровой моделью рельефа. Однако, на практике трехмерная модель поверхности используется для двух классов задач: первая задача – расчеты на земной поверхности; вторая задача – моделирование движения по земной поверхности и над земной поверхностью. В соответствии с этими задачами следует выделить

два типа пространственных моделей: статическую и динамическую. Статическая модель представляет собой классическую цифровую модель, которая строится по характерным точкам поверхности. Ее можно сравнить с фотоснимком, фиксирующим некую ситуацию. Цель построения такой модели в, по возможности, точном отображении реальной поверхности для решения прикладных задач (расчет площадей поверхности, расчет объемов земляных работ, вынос проекта в натуру, мониторинг состояния геотехнического объекта, расчет зон затопления и пр.). Главные требования к моделям этого типа: координатное соответствие между местностью и моделью; точность точек, отображающих поверхность; стационарность построений для наблюдений за поверхностью и мониторинга объектов.

Динамическая модель предназначена для анимации, для тренажеров [2], для обучения и игровой индустрии. Ее можно сравнить с видеозаписью динамики ситуации. Цель построения такой модели в динамическом отображении поверхности для имитации движения и для решения динамических и учебных задач (оперативный осмотр поверхности с разных точек наблюдения, имитация движения по поверхности или над поверхностью, оперативная смена ситуаций, тестирование при проведении геодезических работ, обучение специалистов вождению транспортных средств и прочее).

Главные требования к моделям этого типа: оперативность отображения, визуальное информационное соответствие между местностью и моделью; визуальное подобие модели реальности, оперативность изменения поверхности либо за счет перемещения

точки наблюдения, либо за счет трансформации поверхности (сели, сходы лавин, пожары, затопления, землетрясения), использование динамики модели для развития реакции у оператора в меняющейся обстановке. Такую модель применяют в видеоиграх, в фильмах, обучающих программах и симуляциях [6]. В дальнейшем будем называть эти модели моделями первого типа и моделями второго типа. Целью данной статьи является исследование методов построения пространственных моделей для задач имитационного моделирования, обучения и игровых ситуаций, то есть для моделей второго типа.

Вокселизация как альтернатива пикселизации

Для построения пространственных моделей второго типа применяют технологию вокселизации [9]. Эта технология повышает интенсивность информационных взаимодействий и повышает эффективность взаимодействия пользователя с виртуальной реальностью.

Визуализация моделей первого типа строится на основе технологии пикселизации. Пиксель есть двухмерная ячейка, покрывающая поверхность. Пиксель есть также двухмерная информационная единица. При визуализации реальности с помощью таких моделей строится поверхность оболочки, закрывающая пространство как занавеска. Примером может служить плоская или объемная карта. По существу, это граница между видимым и невидимым. Построение моделей первого типа строится на основе построения поверхностей, закрывающих реальные объемы. Пикселизация создает 2.5D реальность.

Визуализация моделей второго типа строится на основе технологии вокселизации. Воксель есть трехмерная ячейка, элемент объема или трехмерная информационная единица. Он является трехмерным аналогом двухмерной единицы пикселя. Понятие Voxel сформировано из слова объёмный (volumetric) и слова пиксель (pixel), что означает «объемный пиксель». Voxel является элементом объема, в то время как пиксель является элементом поверхности. Voxel, как и пиксель, содержит значение элемента растра, но не в двухмерном, а в трёхмерном пространстве. Воксель заполняет объем, в то время как пиксель покрывает поверхность. Вокселизация создает 3D реальность. На рис. 1 приведены пиксель (рис. 1а) и воксель (рис. 1б).



Рис. 1. Пиксель и воксель

Воксель в общем случае является параллелепипедом. В частном случае это куб. Главное преимущество вокселей в возможности генерации объемных моделей и модификации одних объемных моделей из других. Эту возможность используют в анимациях, трансформируя непохожие объекты друг в друга.

Применение технологии вокселизации для моделирования динамических поверхностей позволяет создавать новые формы объектов и поверхностей на основе модификации объемных исходных моделей [3]. Цифровое моделирование местности для каждой новой цифровой модели требует новых измерений и новых построений. В лучшем случае новые измерения накладываются на старые, комбинируют и строят поверхность. Построение новой поверхности – обязательная процедура при построении моделей первого типа.

Если стоит задача построения моделей второго типа, то цифровое моделирование неприменимо из-за длительного времени построения моделей. Переход от моделей первого типа к моделям второго типа означает переход от многократных измерений к конструированию и генерации поверхности. Переход от моделей первого типа к моделям второго типа означает переход от моделей оболочек к объемным моделям.

Построение видов при использовании моделей первого типа осуществляется за счет построения разовой цифровой модели поверхности, выбора точки наблюдения и решения задачи проектирования. Эта модель не может имитировать смаз изображения при съемке подвижных объектов или при моделировании воздушной съемки.

Построение видов при использовании моделей второго типа достигается за счет построения объемной модели местности, реконфигурации моделей (например, при имитации смаза изображения), выбора множества точек наблюдения и решения задач проектирования. В модели второго типа можно вводить анаморфотность путем модификации вокселя.

Реконфигурация моделей второго типа повышает интенсивность интерактивного взаимодействия «пользователь – динамическая объемная модель». Построение воксельной модели требует волюметрических данных. На первом этапе их получают при помощи измерений. На последующих этапах их генерируют либо с помощью алгоритмов, либо с использованием карт высот.

Принципы технологии вокселизации

На рис. 2 приведен для сравнения пример пикселизации поверхности.

Как видно на рис. 2, поверхность разбивается на участки, которые трансформируются в соответствии с изгибом поверхности. Видно, что такая поверхность представляет собой фрагмент оболочки или границы между пространствами. Воксели, как правило, должны быть преобразованы в полигональную сетку

для отображения. На рис. 3 приведено воксельное представление пирамиды. Воксельное представление изначально огрубляет объекты.

Модель на рис. 3 является ступенчатой и дискретной. Для представления ее в виде гладкой поверхности нужны дополнительные преобразования. С позиций коммуникации воксельная генерация [10] поверхности аналогична цифро-аналоговому преобразованию трехмерного сигнала.

Первое применение воксельной генерации было в области медицины для качественного и сравнительного анализа результатов МРТ. В этих случаях основной была задача сходства/различия и моделирование развития в модели. Воксельная генерация оперативно решает задачи динамического преобразования модели. Это обусловило ее применение в видеоиграх. Вокселизация использует когнитивный анализ и пространственную логику [4].

Для преобразования грубой модели в гладкую применяют специальные алгоритмы, которые называют «алгоритмы генерации шума». На самом деле эти алгоритмы создают не шум, а осуществляют смешивание, наподобие алгоритма скользящего сглаживания. На рис. 4 дан разрез воксельной модели и показаны ситуации сглаживания и превращения ступенчатой функции в гладкую функцию. Ситуация на рис. 4-1 соответствует дискретному ряду

$$f_1 + f_2 + f_3 + f_n \quad (1)$$

Функция f_i упрощенно обозначает высоту сечения.

Ситуация на рис. 4-2 соответствует дискретному ряду, который получается после этапа сглаживания

$$f_1 + ff_1 + f^*_2 + ff_2 + f^*_3 + ff_3 + ff_{n-1} + f_n \quad (2)$$

В выражении (2) ряд содержит два различия. Первое состоит в появлении промежуточных значений ff_i , которые называют сидом (точка раздачи). Второе различие в модификации первоначальных значений функции. В отдельных случаях первое и последнее не изменяют, но чаще также меняют первое и последнее. Итоговая ситуация показана на рис. 4-3.

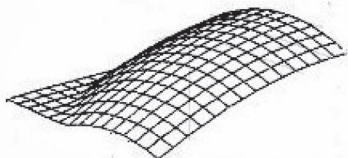


Рис. 2. Представление поверхности в виде пиксельного изображения

$$\text{Lim}_j (f_1 + ff_1 + f^*_2 + ff_2 + f^*_3 + ff_3 + ff_{n-1} + f_n) \rightarrow \varphi(x) \quad (3)$$

В выражении (3) $\varphi(x)$ – гладкая непрерывная функция. На рис. 4-3 она показана сплошной линией, а исходная – пунктирной. Она может быть линейной, что соответствует плоской поверхности. Она может быть нелинейной, что соответствует неплоской, но непрерывной поверхности. Величина j характеризует число итераций для сглаживания.

Известно достаточное количество алгоритмов шума. Это алгоритмы: Шум Перлина, Diamond-Square алгоритм, Value Noise, Шум Ворлея [8]. Сравнение данных алгоритмов на основе их производительности, требуемого объема памяти и качества производимой карты высот приведено в таблице 1.

Алгоритм Diamond-Square является фрактальным. Другие алгоритмы не являются фрактальными. В силу этого их дополняют фрактальным алгоритмом ФБД (фрактальное Броуновское движение). Модификация поверхности использует свойство фрактальности, которое позволяет связывать между собой разные итерации (выражение (2)).

Воксели организуют структурно как разреженные воксельные октотомические деревья (SVO). Эта структура данных построена так, что узел разделен на восемь узлов или октантов, которые называют листовыми. Если все листовые содержат одинаковые данные (либо они пусты, либо имеют одинаковый тип вокселя), то дерево заканчивается в этой точке. Это и есть процедура «разряженное». Данный способ удобен для хранения воксельных данных, когда много больших томов пусты. Это соответствует линейным поверхностям.

В сочетании с вокселями используют понятие доксели. Этим понятием обозначают темпоральные воксели, которые меняются с течением времени. Последовательность доксельных моделей создает трехмерную анимацию. Доксели удобны при имитации движения или полета над поверхностью

Алгоритмы генерации шума используют либо для построения поверхности напрямую, либо для генерации карты высот. Рис. 3 соответствует выражению (1), в результате итераций и применения выражения

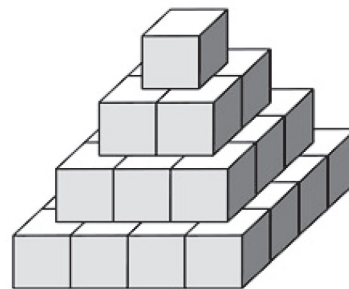


Рис. 3. Воксельное представление пирамиды

(с.3) получается модель поверхности, приведенная на рис. 5.

В принципе, применение разных алгоритмов приведет к одинаковому результату на рис. 5. Проблема модификации или создания поверхности включает три задачи: генерацию карт высот, сглаживание на основе алгоритма шума, построение поверхности.

Для модификации применяют разные алгоритмы, отвечающие условиям проблемы. При построении моделей поверхности используют некоторые свойства реальных поверхностей. Однако, главным условием данной технологии является фрактальное подобие природных и моделируемых объектов. Требование фрактальности ограничивает применимость данной технологии при решении некоторых метрических задач, но не ограничивает его применение в анимации и при игровых и учебных ситуациях. В то же время следует отметить, что применение воксельных моделей позволяет с высокой точностью определять объемы.

Результаты эксперимента

Для моделирования обычно применяют три этапа: информационное конструирование поверхности, сгла-

живание с помощью алгоритмов «шумов», генерацию поверхности из созданной. В [7] проведен анализ информационного конструирования поверхностей и выделен ряд алгоритмов: Surface Nets, Extended Marching Cubes; The Transvoxel Algorithm, Marching Cubes и другие.

В ходе эксперимента на кафедре инструментального и прикладного программного обеспечения РГУ МИРЭА базисным был выбран и использован Marching Cubes, поскольку данный алгоритм является наиболее производительным и легко реализуемым среди всех вышеописанных алгоритмов. Также преимуществом Marching Cubes является то, что для его использования не требуется генерация дополнительных данных (таких, как нормали к поверхности).

Логический или «марширующий куб» перемещается по вершинам вокселя, в результате чего анализируются восемь вершин логического куба. Если вершина входит в поверхность, то она имеет значение «единица», в альтернативном случае – «ноль».

Базисный алгоритм был дополнен оригинальным модулем, разработанным на кафедре ИППИ и включающим следующие свойства:

- генерация поверхности осуществляется с применением карты высот и механизма ФБД;

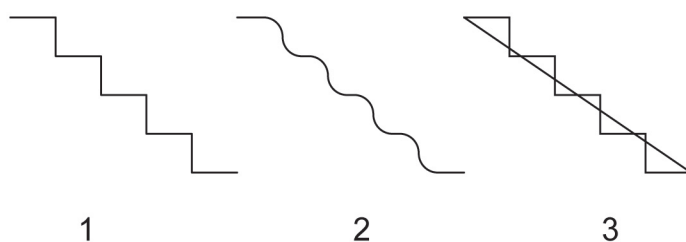


Рис. 4. Механизм сглаживания воксельной поверхности

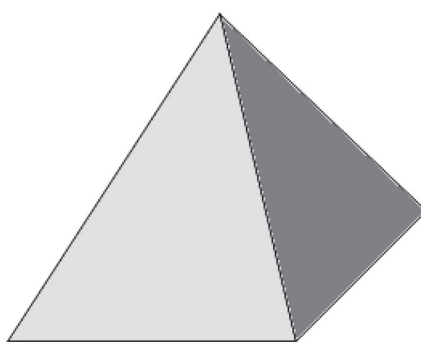


Рис. 5. Результат построения поверхности на основе модификации воксельной модели

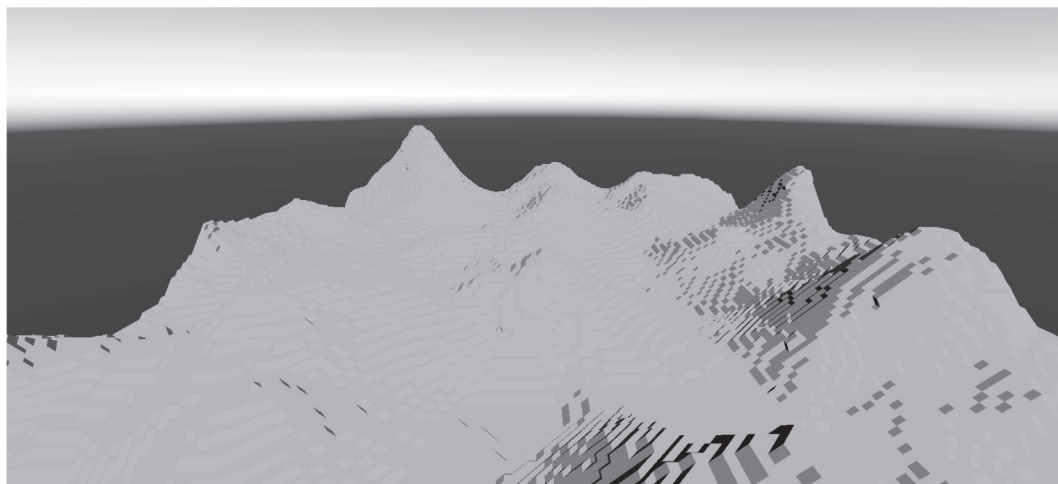


Рис. 6. Базовое конструирование поверхности

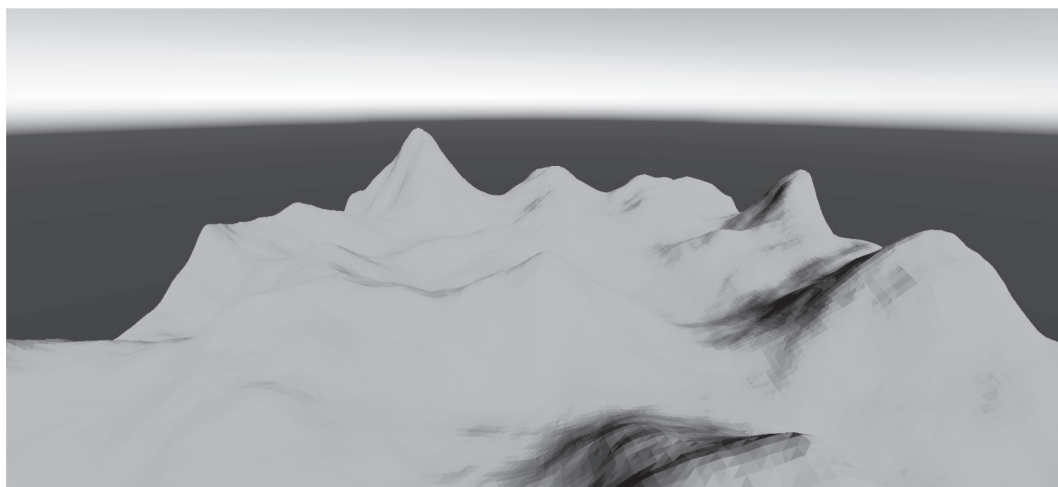


Рис. 7. Модифицированное моделирование поверхности с использованием модуля и трех сидов на воксель

- построение вокселей на основе волнометрических данных и заданных сидов;
- условное деление поверхности на участки возможного преобразования.

В качестве метода сглаживания использован шум Перлина. Для генерации пространственных моделей применен Marching Cubes алгоритм, который включает три этапа:

1. Разбиение реального объема на независимые участки или кластеры из кубических элементов типа на рис. 3.
2. Построение поверхности на кластерах типа рис. 5.
3. На кластерах поверхностей построение нормали к кластеру и построение окончательной формы поверхности. Если поверхность плоская, то третий этап не выполняется.

Для генерации нормалей использован метод Unity RecalculateNormals(). Он включает возможность корректного освещения поверхности. Пример упрощенной генерации приведен на рис. 6. Он является аналогом (но не подобием) виртуальной карты, построенной на полигонах Тиссена.

На рис. 6 показана поверхность с использованием базовой версии Marching Cubes. Видна ступенчатость.

В качестве развития программного обеспечения разработан программный модуль, который использует не один, а три сида на воксель.

Результат генерации поверхности с использованием модуля предоставлен на рис. 7.

Сравнение рис. 6 и рис. 7 показывает большую реальность рис. 7. Соответственно, это помогает оператору тренажера принимать более адекватные и оперативные решения.

Заключение

Анализ воксельной технологии показал ее приемлемость для моделирования поверхности в виртуальной реальности и для целей анимации. Базисное программное обеспечение было дополнено оригинальным модулем, что позволило использовать его при иммерсивном обучении [1] на базе, созданной в РТУ МИРЭА специальной лаборатории. Существуют ограничения применения технологии вокселезации, связанные с фрактальной зависимостью. Но, в то же время, она применима для обучения и моделирования. Следует отметить, что прямое использование алгоритма Marching Cubes (рис. 6) мало реалистично и подходит для игр. Для реалистичности и иммерсивных возможностей целесообразно дополнение его специальным модулем и включение в воксель 2–3 сидов. Данный подход является открытым и позволяет разрабатывать модули любым программистам для решения своих задач. Например, стоит отметить формирование моделей архитектурных замков в работе [5], в которой используются нерегулярные поверхности как совокупность гладких поверхно-

стей. Технология обработки воксельной информации отдаленно напоминает технологию обработки информации при мобильном лазерном сканировании. В обоих случаях используется программное обеспечение, которое варьируется условиями задачи и когнитивным анализом.

Авторы благодарят академика А. С. Сигова за ценные замечания по улучшению качества статьи.

Литература

1. Применение иммерсивных технологий в обучении / П.Г. Болбаков, В.Я. Цветков, В.А. Мордвинов, В.Т. Матчин // Информатизация образования и науки. – 2023. – № 1 (57). – С. 19–26.
2. Бронников, С. В. Применение геоинформатики при управлении полетами космических аппаратов / С.В. Бронников // Вектор ГеоНаук. – 2022. – Т. 5, № 3. – С. 72–79.
3. Bontchev, B. Modern trends in automatic generation of content for Video Games / B. Bontchev // *Serdica Journal of Computing*. – 2016. – Vol. 10, Iss. 2. – P. 133–166.
4. Dolgy, A. I. Spatial logic in process of unmanned vehicle operation / A.I. Dolgy, I.N. Rozenberg, V.Ya. Tsvetkov // *AIP Conference Proceedings*. Krasnoyarsk Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Melville, New York, United States of America, 2021. – 2021. – Vol. 2402, Iss. 1. – P. 50059.
5. Dusterwald, S. Procedural Generation of Voxel Worlds with Castles : Thesis, Master of Science / S. Dusterwald ; University of Waikato, Hamilton, New Zealand. – 2015. – 144 p.
6. A review of digital terrain modeling / E. Galin, E. Guérin, A. Peytavié [et al.] // *Computer Graphics Forum*. – 2019. – No. 38 (2). – P. 553–577.
7. Isosurface Extraction // swiftcoding : сайт. – URL : <https://swiftcoder.wordpress.com/planets/isosurface-extraction> (дата обращения: 04.11.2022).
8. Rose, T. J. Algorithms and Approaches for Procedural Terrain Generation – A Brief Review of Current Techniques / T.J. Rose, A.G. Bakaoukas // 8th International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications (VS-GAMES). – 2016 – 4 p.
9. Xu, Y. Voxel-based representation of 3D point clouds: Methods, applications, and its potential use in the construction industry / Y. Xu, X. Tong, U. Stilla // *Automation in Construction*. – 2021. – Vol. 126. – P. 103675.
10. Zhou, L. 3D shape generation and completion through point-voxel diffusion / L. Zhou, Y. Du, J. Wu // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. – 2021. – P. 5826–5835.