

УДК 004.92

Горлов Александр Дмитриевич, магистрант,
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики

Захарова Оксана Игоревна, доцент,
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики

ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К ПРОЦЕДУРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ 2D И 3D МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ГРАММАТИК ФОРМ

Аннотация. Статья посвящена синтезу двух классов алгоритмов процедурной генерации – параметрического моделирования и грамматик форм. Рассматриваются возможности и ограничения каждого подхода. На основе обзора шести работ, охватывающих гейм-дизайн, L-системы, генерацию ландшафтов, фрактальные текстуры и нейросетевые методы, выделены элементы, пригодные для интеграции. Предложена трехуровневая архитектура гибридного алгоритма, в которой грамматика отвечает за топологический синтез, а параметрические методы – за числовую конкретизацию и соблюдение ограничений.

Ключевые слова: Процедурная генерация, параметрическое моделирование, грамматика форм, L-системы, 2D и 3D модели, гибридные алгоритмы, компьютерная графика.

В современной компьютерной графике и разработке интерактивных систем процедурная генерация 2D и 3D моделей позволяет создавать большие объёмы контента без ручного труда. Два классических подхода – параметрическое моделирование и грамматика форм – обычно развиваются независимо. Параметрические методы обеспечивают точный контроль геометрии через систему переменных и зависимостей, что незаменимо в инженерных задачах. Однако при генерации сложных иерархических структур параметрические описания быстро усложняются. Грамматика форм, включая L-системы, напротив, легко порождает повторяющиеся и ветвящиеся структуры, но плохо справляется с соблюдением жёстких числовых ограничений. Нейросетевые методы, активно исследуемые в последние годы, добавляют элемент неопределённости и креативности, однако их применение для генерации технически корректных 3D-моделей ограничено из-за непрозрачности процесса. В связи с этим перспективным направлением считается гибридизация, при которой разные алгоритмы работают совместно. Настоящая работа анализирует несколько источников, отбирая из каждого конкретные приёмы, пригодные для построения такого гибридного конвейера.

В книге «Процедурная генерация в гейм-дизайне» [1] показано, что успешные процедурные системы строятся на иерархии правил: сначала формируется крупная структура (расположение комнат, форма здания), затем – детали. Также в [1] описаны методы валидации – проверка коллизий, связности, баланса. Эти два принципа (иерархия и валидация) могут быть перенесены в гибридный алгоритм: грамматика будет задавать иерархию частей модели, а отдельный модуль – проверять корректность итоговой геометрии.

Статья Арзамасцевой, Евтихова и Лисовского [2] посвящена L-системам применительно к моделированию предфрактальных спектров. Для целей генерации 2D и 3D форм здесь важен сам аппарат параметрических L-систем, когда символам грамматика сопоставляются числовые атрибуты (длина отрезка, угол поворота). Такой подход позволяет



управлять масштабом и ориентацией элементов на каждом шаге вывода. В предлагаемой гибридной архитектуре L-системы предполагается использовать для генерации ветвящихся структур – деревьев, дорожных сетей, декоративных орнаментов.

В работе Кинтоновой и соавторов [3] рассматривается параметрическое моделирование ландшафта. Характерная черта этого подхода – многоуровневая параметризация: сначала задаются глобальные параметры (тип рельефа, амплитуда неровностей), затем на их основе вычисляются локальные (высоты в отдельных точках, эрозия). Эта идея применима к любому гибриднему алгоритму: грамматика определяет топологию, а параметрический слой вычисляет конкретные размеры и координаты, подчиняясь глобальным ограничениям (например, габаритам сцены или требованиям к объёму).

Исследование Бойкова, Бойковой и Колотева [4] посвящено генерации фрактальных текстур в среде Blender. Помимо демонстрации практической реализации рекурсивных алгоритмов, в статье используется фрактальный шум для параметризации текстурных координат. Этот приём можно адаптировать для генерации 2D-карт (процедурные изображения, схематические планы) и для наложения текстур на 3D-модели, созданные гибридным методом. Кроме того, опыт интеграции с Blender полезен для планирования экспериментальной части.

Две публикации, посвящённые нейросетевым методам [5, 6], не являются прямыми аналогами детерминированной гибридации. Тем не менее, из них можно извлечь метрики оценки качества генерируемого контента. В [5] предлагаются способы сравнения процедурно сгенерированных уровней с ручными по уникальности и разнообразию фрагментов. В [6] обсуждаются подходы к тестированию систем искусственного интеллекта в играх, включая измерение адаптивности и непредсказуемости. Эти метрики могут быть использованы для сравнения гибридного алгоритма с чистыми грамматиками и чистыми параметрическими методами.

Одна из ключевых проблем при объединении грамматик и параметрики – разный формат представления данных на выходе каждого модуля. Грамматика оперирует символами и отношениями вложенности, параметрический решатель – числами и уравнениями. В предлагаемой архитектуре эта проблема решается введением промежуточного представления – атрибутированного синтаксического дерева, где каждый узел несёт не только тип и ссылки на потомков, но также именованные слоты для числовых атрибутов с указанием допустимых диапазонов и связей. Такое дерево может быть построено грамматическим генератором и затем обработано параметрическим решателем без потери информации. Подобный подход встречается в системах на основе атрибутных грамматик, однако применительно к задачам 2D и 3D генерации он разработан недостаточно.

Дополнительным требованием к гибриднему алгоритму является возможность работы в режиме реального времени или близком к нему. Для этого в архитектуру вводится кэширование часто встречающихся поддеревьев с уже вычисленными параметрами. Если в процессе вывода встречается фрагмент, изоморфный ранее сгенерированному (например, типовое окно или повторяющийся декоративный элемент), параметрический решатель не пересчитывает его заново, а подставляет готовое решение с возможным масштабированием. Такой приём заимствуется из практики параметрического моделирования [3] и позволяет значительно ускорить генерацию сложных сцен, состоящих из множества однотипных объектов.

На основе рассмотренных источников формулируется архитектура гибридного алгоритма, состоящая из трёх последовательных модулей.

Первый модуль – грамматический генератор структуры. На вход подаётся описание типа модели (например, «двухэтажное здание с крыльцом» или «дерево с тремя ярусами ветвления») и набор глобальных ограничений (максимальные размеры, запрет на



пересечения). Грамматика, вдохновлённая L-системами [2] и иерархическими правилами [1], порождает дерево вывода. Каждый узел дерева соответствует конструктивному элементу модели и снабжён списком параметров, которые пока не конкретизированы.

Второй модуль – параметрический решатель. Он обрабатывает дерево от первого модуля и вычисляет числовые значения всех параметров (длины, ширины, углы, координаты) так, чтобы выполнялись глобальные ограничения и локальные зависимости. Используется многоуровневая параметризация [3]: сначала определяются грубые параметры (общие габариты), затем на их основе – более мелкие (толщина стен, размеры окон). Если система ограничений противоречива, модуль возвращает управление первому модулю для выбора альтернативной ветви грамматики.

Третий модуль – верификация и построение геометрии. Параметризованное дерево преобразуется в набор примитивов (полигоны для 2D, меши для 3D). Выполняется проверка на самопересечения, замкнутость объёма и другие технические ошибки по методикам [1]. При обнаружении ошибок запускается итерационный цикл: сначала корректировка параметров (возврат ко второму модулю), при неудаче – перебор альтернативных правил грамматики (возврат к первому модулю). Метрики разнообразия [5, 6] используются на этапе оценки результатов.

Сравнение предложенной трёхмодульной схемы с известными гибридными реализациями (например, с системами, где грамматика лишь генерирует текст, а параметрика выполняется отдельным скриптом) показывает, что ключевое отличие – наличие обратных связей и итеративного цикла. В большинстве существующих работ грамматический и параметрический этапы выполняются однократно и независимо, что не позволяет исправлять ошибки, возникающие из-за несовместимости параметров. Предлагаемый подход за счёт возвратов и кэширования повышает вероятность получения корректной модели при сохранении высокого разнообразия.

Практическая значимость такой архитектуры не ограничивается игровой индустрией. В архитектурном моделировании гибридный алгоритм может использоваться для быстрого перебора вариантов фасадов при заданных ограничениях по этажности и площади. В системах виртуальной реальности – для генерации процедурных ландшафтов с соблюдением реалистичных уклонов и водных поверхностей. В образовательных целях – для создания бесконечного набора упражнений по трёхмерному моделированию, где каждый пример генерируется автоматически, но не содержит геометрических ошибок.

Таким образом, из каждой проанализированной работы извлекается конкретный компонент. Из [1] – иерархия правил и валидация. Из [2] – параметрические L-системы. Из [3] – многоуровневая параметризация. Из [4] – фрактальные шумы и опыт среды Blender. Из [5] и [6] – метрики разнообразия и тестирования. Все эти элементы интегрируются в единый трёхмодульный конвейер с промежуточным атрибутированным деревом, кэшированием и итеративным возвратом. Предложенная архитектура может служить основой для программной реализации гибридного алгоритма генерации 2D и 3D моделей. Экспериментальное сравнение с чистыми грамматиками и чистыми параметрическими методами на тестовых наборах (здания, деревья, ландшафтные элементы) позволит оценить эффективность подхода.

Список литературы:

1. Шорт Т.Х. Процедурная генерация в гейм-дизайне / Т.Х. Шорт, Т. Адамс, Дж. Бакенгэм; пер. с англ. М.С. Рыжиковой. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 344 с.
2. Арзамасцева Г.В. Компьютерное моделирование мультиплицирования фурье-спектров предфракталов L-системы / Г.В. Арзамасцева, М.Г. Евтихов, Ф.В. Лисовский // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2012. – Т. 17, № 12. – С. 29-32.



3. Кинтонова А. Проектирование ландшафта с помощью алгоритмов генерации / А. Кинтонова, Г. Габдрешов, А. Кисманова, Қ. Сансызбай // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2023. – № 1(124). – С. 182-194.

4. Бойков А.А. Генерация фрактальных текстур на гиперэпюре в редакторе "Blender-3D" / А.А. Бойков, Н.А. Бойкова, А.Е. Колотев // Журнал естественнонаучных исследований. – 2024. – Т. 9, № 4. – С. 76-81.

5. Петров М. Концептуальные модели процедурной генерации уровней в играх с применением нейронных сетей // Актуальные исследования. – 2025. – № 10(245). – С. 39-45.

6. Тихомиров Д.С. Использование искусственного интеллекта в компьютерных играх // Международный научный журнал "Вестник науки". – 2025. – Т. 2, № 5(86). – С. 914-925.

