

Перспективные схемы пространственно-временной индексации для визуального моделирования масштабных индустриальных проектов

*Золотов В. А., Семенов В. А.
ИСП РАН, Москва
{vladislav.zolotov, sem}@ispras.ru*

Аннотация. Технологии и системы визуального пространственно-временного моделирования проектов получили распространение в последние годы. Однако невозможность применения к масштабным индустриальным проектам и программам является одним из ключевых факторов, сдерживающим их широкое применение. В работе обсуждаются проблемы эффективности и масштабируемости систем данного класса, а также пути решения на основе индексации проектных данных. Для предложенных схем пространственно-временной индексации и выделенных типов запросов описаны алгоритмы исполнения, а также получены оценки их вычислительной сложности. Полученные оценки подтверждают эффективность и перспективность предложенных схем индексации, а выработанные рекомендации помогают в их практической реализации.

Ключевые слова: 4D моделирование, пространственная индексация, бинарные деревья поиска, октальные деревья, вычислительная сложность

1. Введение

С начала 2000 годов технологии визуального пространственно-временного (4D) моделирования проектов получили значительное распространение и с успехом применяются в различных индустриальных областях [1, 2]. Традиционные методы календарно-сетевого планирования предполагают широкое использование визуальных инструментов для представления проектов в виде сетевых структур, диаграмм Ганта, графиков сбалансированности ресурсов и освоения финансовых средств. Однако они оказались крайне ограниченными для анализа индустриальных программ с учетом пространственного и временного фактора. В отличие от них, технологии 4D моделирования позволяют визуально реконструировать ход выполнения проектных работ, выявить потенциальные проблемы еще на стадии проектирования и планирования проекта и, тем самым, уменьшить технологические риски и финансовые издержки в ходе его реализации [3, 4]. В

частности, визуальное моделирование позволяет определить пространственные коллизии между элементами воздвигаемых конструкций, обнаружить отсутствие опорных элементов, а также выявить конфликтные ситуации, связанные с одновременным проведением нескольких работ в одной и той же пространственной зоне. В более широком смысле 4D моделирование подразумевает не только визуализацию существующего проекта, но и его многофакторный анализ и планирование, благодаря которым достигаются следующие важные цели:

- Улучшенная координация участников проекта за счет единой картины проектной площадки и прозрачной визуальной интерпретации хода проектных работ;
- Высокая достоверность календарно-сетевых графиков, подготовленных и верифицированных на отсутствие пространственно-временных конфликтов;
- Скорректированная логистика проекта с учетом пространственного планирования рабочих зон и оптимального размещения и перемещения ресурсов.

Преимущества 4D технологий оказались настолько очевидными и востребованными для широких индустриальных сообществ [5], что программные компании, специализирующиеся, главным образом, в области создания систем автоматизированного проектирования и систем управления проектами, расширили свои линейки продуктов соответствующими решениями. В первую очередь, к ним следует отнести Autodesk NavisWorks, Bentley Schedule Simulator, Intergraph Schedule Review, AstaPowerproject BIM, VICO, Synchro. Однако, несмотря на популярность перечисленных систем, все они имеют серьезный недостаток, связанный с невозможностью эффективного применения к масштабным индустриальным программам. Их анализ предполагает обработку значительных объемов проектной информации, консолидирующая как структуру планов, детальные календарно-сетевые графики проектных работ, так и точные трехмерные геометрические модели многочисленных элементов возводимых объектов.

Подход, реализуемый в традиционных системах планирования и управления проектами посредством WBS (Work Breakdown Structure) структур, учитывает естественную иерархическую организацию проектных планов и позволяет составлять частичные календарно-сетевые графики. Однако подход не обобщается на случай пространственно-временных данных, с которыми оперируют системы 4D моделирования в ходе трехмерной анимации хода работ, при поиске пространственных конфликтов, анализе загруженности рабочих зон и т.п.

В то же время, хорошо зарекомендовали себя структуры пространственной индексации, которые позволяют существенно снизить вычислительные расходы на исполнение запросов, связанных с анализом больших

многомерных данных [6, 7]. В частности, при анализе и растеризации больших статических трехмерных сцен часто применяют октальные деревья, k-d деревья, BSP-деревья, BRep-индексы, R-деревья. Непосредственное применение данных структур к динамическим сценам крайне неэффективно, поскольку они не учитывают характер пространственно-временной когерентности сцен и требуют значительных накладных расходов для перманентного обновления пространственных индексов.

В данной работе предлагается и исследуется несколько перспективных схем пространственно-временной индексации для приложений визуального моделирования масштабных индустриальных проектов. Они реализуют принцип декомпозиции и обеспечивают эффективный доступ к актуальным проектным данным, релевантным заданному интервалу времени и заданной области пространства. Предложенные схемы индексации анализируются в контексте типовых запросов, возникающих в приложениях визуального моделирования проектов.

Следует отметить, что ранее предпринимались попытки использования декомпозиции для индексации временных и пространственных данных. В частности, в ряде работ решалась задача эффективной растеризации трехмерных данных при генерации видео с использованием дерева Финкельштейна [8], временного дерева пространственной декомпозиции [9] и дерева Шена [10]. В наших работах близкие структуры с успехом применялись для определения столкновений в динамических сценах [11, 12]. Безусловно, подобные структуры представляют несомненный интерес и в контексте обсуждаемых задач визуального моделирования [12, 13, 14].

Раздел 2 представляет собой короткое введение в системы визуального моделирования и планирования проектов. В нем также приводятся характеристики типовых сцен и запросов, возникающих в данных системах. В разделе 3 подробно описывается три альтернативные схемы пространственно-временной индексации сцен, а также указываются их принципиальные отличия от упомянутых выше деревьев. Раздел 4 посвящен выводу оценок вычислительной сложности разрешения типовых запросов, которые систематизируются и обсуждаются в разделе 5. В заключении подводятся итоги проведенного исследования.

2. Постановка задачи

Современные системы визуального моделирования и планирования проектов довольно разнообразны по своим возможностям, однако имеют общие функции, связанные с визуализацией и анализом динамических пространственно-трехмерных сцен. Как правило, сцены, возникающие в данных системах, имеют следующие особенности:

- *Высокая сложность.* Предполагается, что сцены могут состоять из сотен тысяч и миллионов объектов, имеющих собственное

геометрическое представление и индивидуальное динамическое поведение. Допускается, что составные объекты имеют сложную иерархическую организацию;

- *Смешанное геометрическое представление.* Объекты сцены представляются геометрическими каноническими примитивами, неявно заданными параметрическими кривыми и поверхностями, сплайнами, выпуклыми и невыпуклыми многогранниками, сложными формами в граничном и конструктивном твердотельном представлении (BREP, CSG);
- *Псевдо-динамика.* События в сцене строго детерминированы и связаны с появлением, перемещением и удалением объектов в дискретные моменты времени, обычно определяемые началом или окончанием соответствующих проектных работ. Предположение о превалирующем дискретном характере событий существенно, поскольку позволяет исключить из рассмотрения случаи непрерывного перемещения объектов. Данные случаи неизбежно моделируются дискретным образом, но могут приводить к необходимости обработки огромного числа событий, значительно превышающим число проектных работ.

Эффективность визуализации и анализа подобных сцен во многом определяет возможности систем визуального моделирования для планирования масштабных индустриальных проектов и программ. На сегодняшний день эта проблема не решена. Универсальные реляционные или объектно-ориентированные СУБД позволяют организовать хранение больших объемов проектных данных во внешней памяти и обеспечить доступ к ним в ходе решения соответствующих вычислительных задач. Однако даже если все проектные данные размещены в оперативной памяти, возникает проблема эффективного исполнения запросов, которые обычно связаны с выборкой и анализом данных, релевантных заданному временному интервалу и пространственной области. Проведенные вычислительные эксперименты показывают, что без организации пространственно-временной индексации разрешить подобные запросы в разумное время невозможно. Для анализа альтернативных схем индексации мы выделили четыре типовых операций (или запросов):

- развертывание структур пространственно-временной индексации (Q1);
- реконструкция сцены на заданный момент времени (Q2);
- выборка объектов, лежащих в области видимости (Q3);
- анимация выполнения проекта с изменением положения камеры (Q4).

Предполагается, что развертывание структур индексации (Q1) выполняется до начала визуализации и анализа сцены. Развернутые структуры могут многократно использоваться при разрешении серий пространственно-

временных запросов. В ряде случаев исполнение запросов требует обновления соответствующих индексов.

Проиллюстрируем выделенные запросы, следуя принципам функционирования системы Synchro и используя экранный снимок системы, приведенный на рис.1. Как видно, графический интерфейс пользователя совмещает в себе диаграмму Ганта, типичную для систем управления проектами и используемую для визуального представления календарно-сетевых графиков, и окна просмотра трехмерных сцен, характерные для систем компьютерной графики и систем автоматизации проектирования. Временной репер, отображаемый на диаграмме Ганта красной вертикальной линией, соответствует текущему проектному времени. Диаграмма Ганта и окна просмотра сцен синхронизованы между собой в том смысле, что трехмерная модель возводимого сооружения в окнах просмотра соответствует текущему проектному времени. Перемещая временной репер по календарной оси, можно наблюдать за ходом проектных работ и связанными с ними изменениями в трехмерной модели сооружения. Результаты анимации могут быть сохранены как серии изображений или сгенерированный видео файл и использоваться в дальнейшем в качестве иллюстраций к проектной документации. Камеры просмотра в каждом из окон установлены таким образом, чтобы иметь возможность наблюдать за наиболее важными зонами проекта. Иногда в ходе анимации проектных работ требуется плавно перемещать фокус камеры таким образом, чтобы новые активные зоны проектной площадки попадали в поле зрения наблюдателя. Обсуждаемая система представляет для этого необходимые инструменты, позволяющие согласовать перемещения камеры с проектным временем.

Описанные сценарии функционирования системы предполагают исполнение перечисленных выше запросов. Любое перемещение временного репера приводит к необходимости обновления окон просмотра, для чего требуется реконструировать представление сцены на заданный момент времени (Q2). Поскольку состояние сцены меняется в моменты времени, ассоциируемые с началом и окончанием соответствующих работ, процесс реконструкции состоит в инкрементальных обновлениях, порождаемых проектными событиями.

Заметим, что для обновления графического контента окон, вообще говоря, нет необходимости реконструировать и растеризовать всю сцену. Запрос Q3 предполагает выборку только тех объектов, которые попадают в призму видимости камеры. Техника удаления невидимых объектов (frustum culling) широко применяется в приложениях компьютерной графики для оптимизации процессов растеризации. Данный запрос исполняется всякий раз, когда пользователь осуществляет навигацию по сцене, меняя положение камеры, даже если проектное время зафиксировано.

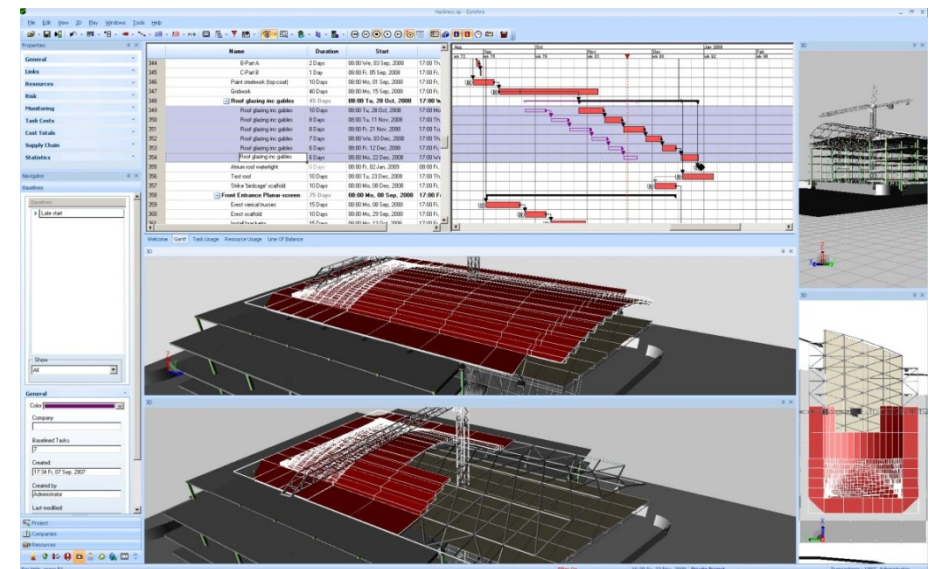


Рисунок 1. Графический интерфейс системы визуального моделирования Synchro

Запрос Q4 соответствует описанному выше сценарию анимации проектных работ при перемещении положения камеры. Данный сценарий предполагает одновременное и согласованное изменение представления сцены и положения камеры вида.

Таким образом, запрос Q2 подразумевает визуализацию проектных данных при фиксированном положении камеры, но в разные моменты проектного времени, запрос Q3 — визуализацию данных с разных ракурсов, но в фиксированный момент времени, а запрос Q4 — визуализацию данных с разных ракурсов в разные моменты времени. Запрос Q1 соответствует предварительной подготовке структур индексации, необходимых для последующего разрешения запросов других типов.

3. Схемы пространственно-временной индексации

Обсудим возможные подходы к организации пространственно-временных индексов для проектных данных. Прежде всего, обсудим базовые структуры данных, которые могли бы использоваться для этих целей.

Для временной индексации событий целесообразным представляется применение сбалансированных бинарных деревьев поиска, которые позволяют эффективно работать с множествами элементов данных даже в тех случаях, когда их ключевые значения изменяются, например, в ходе коррекции временных параметров в календарно-сетевых графиках.

Структуры, подобные AA-дереву, AVL-дереву или красно-черному дереву, позволяют выполнить поиск, вставку и удаление элементов за логарифмическое время. При этом обход всех элементов выполняется за линейное время.

В качестве пространственного индекса для статической трехмерной сцены можно было бы использовать регулярное октальное дерево, формируемое в результате рекурсивного разбиения пространства сцены на восемь одинаковых октантов. Процедура разбиения обычно применяется до тех пор, пока ячейка больше заданного размера, а количество объектов сцены, локализуемых в непустой ячейке, превышает заданный порог. Методы пространственной декомпозиции и, в частности, октальные деревья позволяют значительно сократить трудоемкость выполнения типовых запросов, связанных с выборкой объектов по заданной области, поиском ближайшего соседа или определением столкновений.

Event sequence

Event (ID1, Appearance, &Element, Start, Location, &Node1, &Cell)
 Event (ID2, Disappearance, &Element, End, Location, &Node2, &Cell)

Other Events...

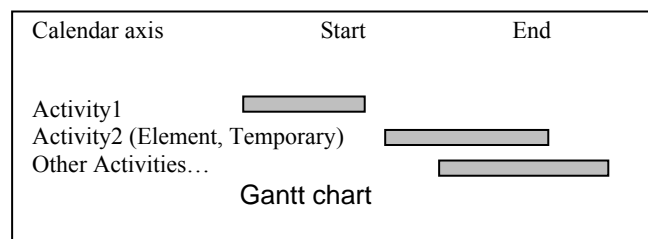


Рисунок 2. Интерпретация событий в приложениях визуального моделирования

Пространственное октальное дерево и временное дерево событий реализуют очевидный принцип: анализу необходимо подвергать лишь те объекты сцены, которые находятся в рассматриваемой области пространства, а обрабатывать лишь те события, которые происходят в интересующем интервале времени. Данный принцип достаточно естественен для обсуждаемых приложений визуального моделирования и возникающих в них сцен. События в них строго детерминированы и обычно связаны с началом или окончанием проектных работ. События визуально интерпретируются в соответствии с назначенным поведенческим шаблоном, как операции появления или удаления соответствующих объектов сцены в заданные моменты времени в заданном месте. Операция перемещения объекта всегда может быть смоделирована

парой операций: удалением объекта с предшествующей позиции и появлением в новой позиции.

Рассмотрим пример календарно-сетевого графика, представленного на рисунке 2, и способ визуальной интерпретации событий в нем. Работа “Activity 2” начинается и заканчивается в точках временной оси “Start” и “End” соответственно. С данной работой ассоциирован трехмерный объект “Element”, которому приписан шаблон “Temporary”. Данный шаблон подразумевает появление объекта в сцене в момент начала соответствующей работы и его удаление в момент завершения работы. Объект занимает положение “Location” на всем протяжении выполнения работы.

Дадим формальное определение пространственного события. Событие — это семерка {ID, TYPE, ELM, TIME, LOC, NODE, CELL}, где ID — идентификатор события, TYPE — тип события (появление, исчезновение или перемещение), ELM — ссылка на трехмерный объект сцены, TIME — время события, LOC — место события (более точно, положение объекта, которое обычно задается в виде матрицы трансформации). Будем также считать, что при наличии развернутого пространственно-временного индекса, структура события может быть дополнена ссылками на элементы временного и пространственного деревьев (NODE и CELL соответственно). До сих пор мы предполагали, что события индексируются с помощью временного дерева, а объекты сцены — с помощью пространственного. Однако пространственное представление динамической сцены непосредственно связано с последовательностью происходящих в ней событий, поэтому обсуждаемые структуры индексации не могут рассматриваться как независимые и необходима организация единого пространственно-временного индекса. Обсудим три альтернативные схемы организации подобного индекса с использованием описанных выше деревьев.

3.1. Схема А. Временно-пространственная декомпозиция

Первая из обсуждаемых схем представляет собой естественное обобщение октальных деревьев на динамический случай. Временное дерево выступает в роли первичного индекса, который разворачивается единожды для всех событий, происходящих в детерминированной псевдодинамической сцене. С помощью однонаправленных ассоциаций узлам временного дерева ставятся в соответствие соответствующие события. Такая организация позволяет определять события, происходящие в сцене на заданном временном интервале, достаточно эффективно.

Пространственное октальное дерево строится на любой заданный момент времени и затем обновляется с учетом текущего проектного времени и прошедших за соответствующий период событий. Вообще говоря, пространственное дерево может претерпевать существенные изменения в ходе моделирования масштабного проекта с большим числом объектов и связанных с ними событий. Однако, как правило, обновления носят локальный характер

и могут быть организованы путем инкрементальной коррекции лишь тех ячеек пространственного дерева, в которых обрабатываемое событие происходит.

Октанты пространственного дерева содержат в себе списки трехмерных объектов сцены, локализуемых в них на текущий момент времени. Это позволяет эффективно разрешать ряд запросов. Например, поиск объектов в заданной пространственной области может быть осуществлен путем последовательного анализа ячеек, лежащих в заданной области или пересекающих ее, и сбором всех располагающихся в них объектов. Анализ организуется как обход октального дерева в глубину с отсечением тех октантов и их дочерних поддеревьев, которые заведомо не попадают в интересующую область поиска.

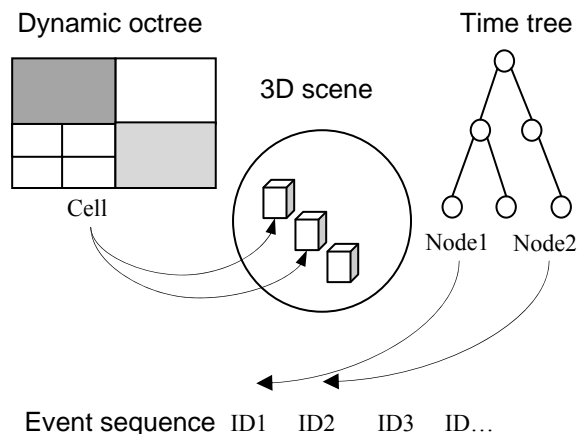


Рисунок 3. Схема временно-пространственной декомпозиции

На рисунке 3 представлена описанная схема индексации проектных данных, а также показаны связи между пространственным октальным деревом, временным деревом, объектами сцены и событиями, происходящими в ней.

В данной работе предполагается, что габариты объектов сопоставимы или меньше размеров листовых октантов и поэтому все объекты сцены локализуются в них. В более общем случае, когда трехмерный объект имеет большие габариты или пересекается гранями октантов верхних уровней, он всегда может быть ассоциирован с одним из родительских октантов или сразу с несколькими листовыми окантами. Для краткости изложения и упрощения проводимого в дальнейшем анализа эффективности схем индексации эти особенные случаи не рассматриваются.

3.2. Схема В. Событийная индексация

Данную схему индексации можно рассматривать в качестве развития предыдущего варианта, поскольку применяются схожие структуры данных и

реализуются близкие принципы индексации. Однако она имеет ряд принципиальных отличий, которые проиллюстрированы на рис. 4.

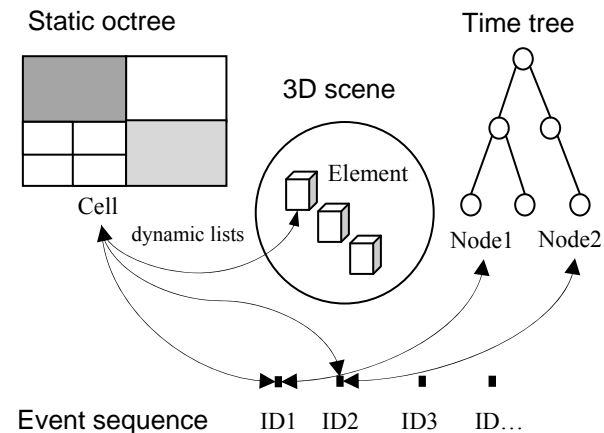


Рисунок 4. Схема событийной индексации

Октанты пространственного дерева хранят списки всех событий, происходящих в них в ходе всего периода моделирования сцены. Такие списки насчитываются предварительно и затем используются для разрешения пространственных запросов. В отличие от предыдущей схемы, в которой октанты хранят списки объектов, локализуемых в них на текущий момент времени и корректируемых по мере наступления новых событий, обсуждаемые структуры индексации полностью статичны и не нуждаются в перманентных обновлениях в процессе моделирования.

Тем не менее, для быстрого разрешения ряда пространственных запросов в сцене, реконструируемой на заданный момент времени, иногда желательно поддерживать в окантах и динамические списки локализуемых в них объектов. Данный вариант индексации в определенном смысле дополняет предыдущую схему, однако возвращает нас к необходимости обновлений.

В подобном варианте схема обладает большей гибкостью, поскольку допускает несогласованные обновления динамических списков объектов. Состояния списков в разных окантах могут соответствовать разным моментам времени и, следовательно, не отражать реальное представление динамической сцены на текущий момент времени. Например, в ходе навигации обычно визуализируются относительно небольшие фрагменты сцены и, вообще говоря, не возникает необходимости в полной ее реконструкции. Вместо этого, реконструкции подлежат лишь те фрагменты сцены, которые принадлежат видимым окантам. В тем случаях, когда в область видимости попадает вся сцена, то обновляются все списки объектов.

Для поддержки данной схемы в каждом октанте необходимо дополнительно хранить также проектное время, которому соответствуют насчитанные списки объектов.

3.3. Схема С. Пространственно-временная декомпозиция

Наконец, обсудим схему пространственно-временной декомпозиции. В каждом октанте пространственного дерева развертывается и хранится временное дерево событий, происходящих в нем в ходе всего периода моделирования сцены. Пространственное дерево в данной схеме используется в качестве первичного индекса, а частичные временные деревья — в качестве вторичного индекса (смотри рис. 5). Подобная организация хорошо подходит для разрешения сложных запросов, адресуемых как к области пространства, так и временному интервалу. Вся структура индексации развертывается один раз перед началом моделирования и может использоваться без каких-либо обновлений. Однако, как и в предыдущем случае, мы предпочитаем дополнить ее динамическими списками объектов для более эффективного разрешения пространственных запросов. Пожалуй, единственным недостатком данной схемы является проблематичность разрешения временных запросов, например, связанных с определением событий, происходящих в заданном интервале времени. Для этого пришлось бы организовать полный обход пространственного дерева и выполнить поиск событий в каждом листовом октанте, используя частичные временные деревья.

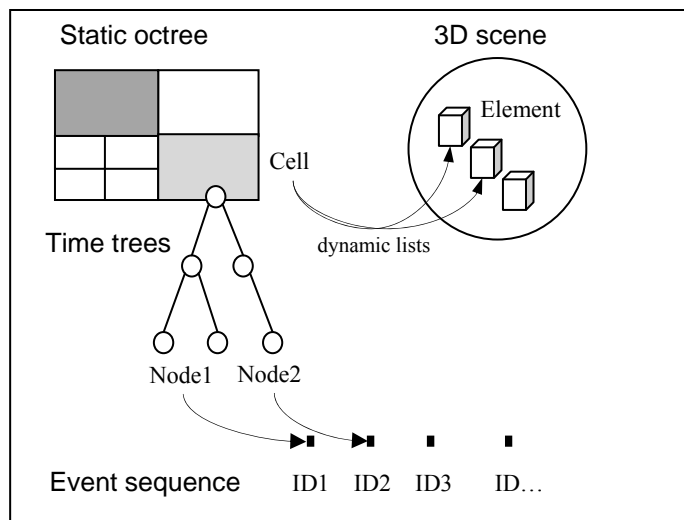


Рисунок 5. Схема пространственно-временной декомпозиции

По построению, описанная структура индексации очень похожа на дерево Шена [10], используемое в приложениях растеризации сцен. Однако

ключевым отличием и важным преимуществом описанного варианта является прямое ассоциирование узлов временных деревьев с событиями, что позволяет избежать избыточное хранение объектов сцены, свойственное структуре Шена.

4. Анализ эффективности

Для оценки эффективности предложенных схем пространственно-временной индексации сделаем ряд предположений относительно характеристик сцен, подлежащих визуальному моделированию и анализу, а именно:

- сцена представляет собой куб со стороной x ;
- все объекты являются кубами одинакового размера Δx ;
- события в сцене происходят последовательно, причем каждое событие инициирует появление одного нового объекта в положении, зафиксированном на протяжении всего периода моделирования сцены;
- перед началом моделирования динамическая сцена пуста, а в конце моделирования содержит N объектов, равномерно распределенных по объему сцены.

Линейным фактором сцены назовем величину $\delta = \frac{\Delta x}{x}$, выражающую

относительные линейные габариты объекта, а объемным фактором —

величину $\nu = \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^3$, выражающую относительный объем индивидуального

объекта. Введем также параметры α, β, γ , характеризующие класс рассматриваемых сцен и способы навигации в них. Параметр $\alpha > 0$ определяет пространственную наполненность сцены на момент окончания моделирования $\alpha = \nu N$. Объем видимой области относительно объема всей сцены определим как $\beta \in [0, 1]$. Отношение длины анализируемого временного интервала ко всему периоду моделирования сцены обозначим как $\gamma \in [0, 1]$.

Получим оценки сложности исполнения типовых запросов в указанных выше предположениях относительно характеристик сцен. Оценки вычислительной сложности будут получены в среднем. Итак, пусть C_{Time} — стоимость локализации события во временном дереве, C_{Box} — стоимость локализации объекта в октальном дереве, C_{Cone} — стоимость проверки факта пересечения конуса и куба. Для простоты предположим, что расходы на организацию структур данных в памяти и навигации по ним пренебрежимо малы. Также не

будем учитывать расходы на формирование результатов запросов и растеризацию моделируемых сцен.

4.1. Развертывание пространственно-временного индекса (Q1)

Прежде всего, оценим вычислительную стоимость развертывания и поддержки структур данных для различных схем пространственно-временной индексации. Анализ проведем отдельно для пространственного октального дерева и временного дерева. Поскольку в начальном состоянии сцена пуста, развертывание пространственного дерева в схеме временно-пространственной декомпозиции не требует вычислительных затрат.

Согласно сделанным выше предположениям объекты сцены локализуются в листьях октального дерева на глубине $L = \log(1/\delta)$, если $\alpha > 1$ и

$L(N) = \frac{1}{3} \log(N)$ в противном случае. Оценим среднее количество

листовых октантов, которым может быть приписан один и тот же объект. Вероятность одновременного пересечения объекта тремя секущими плоскостями на уровне $l \in [1, L]$ равна δ_l^3 , где $\delta_l = 2^l \delta$ — эффективный относительный размер объекта. В этом случае объект приписывается сразу восьми дочерним октантам уровня $l+1$. Вероятность пересечения объекта любыми двумя секущими плоскостями равна $3\delta_l^2(1-\delta_l)$. В этом случае объект приписывается четырем октантам следующего уровня. Вероятность пересечения объекта одной из секущих плоскостей равна $3\delta_l(1-\delta_l)^2$. В этом случае объект локализуется в двух октантах. И, наконец, вероятность того, что ни одна из секущих плоскостей не пересекает объект равна $(1-\delta_l)^3$. Тогда в среднем каждый объект ассоциируется с R_l окантами уровня l , число которых выражается следующим образом:

$$R_l = 8\delta_l^3 + 12\delta_l^2(1-\delta_l) + 6\delta_l(1-\delta_l)^2 + (1-\delta_l)^3$$

Тогда стоимость локализации объекта выражается как $C_{Box}R(L)$, где

$$R(L) = \sum_{l=1}^L R_l, \text{ а стоимость развертывания всего октального дерева}$$

определяется как $C_{Box}R(L)N$, поскольку сцена содержит ровно N объектов. Можно показать, что функция $R(L)$ может быть представлена как

$$R(L) = \frac{1}{98}(5\delta^3 2^{3L+4} - 35\delta^3 2^{3L+4} L - 80\delta^3 - 49\delta^2 2^{2L+3} + 147\delta^2 2^{2L+3} L - 392\delta^2 - 147\delta 2^{L+2} + 147\delta 2^{L+2} L + 588\delta + 49L^2 + 49L)$$

и для нее имеет место оценка $R(L) < 4(L+1)L$.

Во всех рассматриваемых схемах временные деревья — статические структуры, формируемые один раз. Для схем В и С стоимость развертывания временного дерева равна $C_{Time} \log(N!)$, где число объектов N совпадает с числом событий в сцене. В случае схемы пространственно-временной декомпозиции частичные временные деревья формируются в каждом 8^L октантов пространственного дерева. Поскольку в каждом октанте происходит в среднем $\frac{N}{8^L}$ событий, общая стоимость развертывания всех временных

деревьев равна $C_{Time} 8^L \log((\frac{N}{8^L})!)$.

4.2. Реконструкция сцены на заданный момент времени (Q2)

Запрос реконструкции сцены на заданный момент времени выполняется в предположении, что состояние сцены известно для предыдущего момента времени и требуется обновить сцену на текущий момент времени. Для этого требуется установить все события, прошедшие за данный временной интервал, и соответствующим образом скорректировать представление сцены.

Для схемы событийной индексации запрос можно исполнить двумя способами. Первый состоит в том, чтобы вначале определить все прошедшие события, используя временное дерево. Это может быть выполнено за $C_{Time} \gamma N$, где фактор γ определяет интенсивность событий на временном интервале таким образом, что значение $\gamma = 0$ соответствует случаю отсутствия событий, а значение $\gamma = 1$ соответствует случаю реконструкции событий всего периода моделирования. При таком способе требуется дополнительный анализ принадлежности объектов области видимости.

Второй способ подразумевает использование пространственного дерева в качестве первичной структуры поиска. С этой целью осуществляется навигация по видимым октантам и в каждом из них проводится поиск событий, лежащих в интересующем временном интервале. Затраты могут быть оценены как $C_{Time} \beta R(L)N$, где множитель $R(L)$ отражает тот факт, что объект может быть ассоциирован сразу с несколькими окантами уровня L .

Таким образом, при оптимальной стратегии трудоемкость реконструкции сцены на основе схемы событийной индексации составляет

$$C2_B = \min((C_{Time} + C_{Cone})\gamma N, C_{Time}\beta R(L)N)$$

При использовании схемы пространственно-временной декомпозиции обход октального дерева должен быть дополнен быстрым поиском событий с применением развернутых частичных временных деревьев. Принимая во внимание равномерное распределение объектов по сцене, число событий на заданном временном интервале, попадающих в область видимости, определяется величиной $\beta\gamma R(L)N$, а затраты на реконструкцию сцены могут быть оценены как

$$C2_C = C_{Time}\beta\gamma R(L)N$$

Наконец, оценим затраты на выполнение запроса при помощи схемы временно-пространственной декомпозиции. Поиск событий на интересующем временном интервале занимает $C_{Time}\gamma N$. Чтобы обновить динамические списки объектов в октантах пространственного дерева требуется локализовать и вставить γN объектов. Если глубина октального дерева на текущий момент времени составляла $1 \leq L' \leq L$, то затраты на обновление пространственного дерева составляют $C_{Box}R(L')N$. Следовательно, трудоемкость реконструкции сцены при помощи схемы А можно оценить следующим образом:

$$C2_A = C_{Time}\gamma N + C_{Box}R(L')\gamma N$$

4.3. Поиск объектов в области видимости (Q3)

Данный запрос может быть разрешен одинаково для всех рассматриваемых схем индексации. Для этого необходимо выполнить обход видимых октантов пространственного дерева и установить видимые объекты и связанные с ними события. Для схем В и С это может быть выполнено за

$$C_{Cone}\beta\sum_{l=1}^L 8^l = C_{Cone}\beta\frac{8(8^L - 1)}{7}, \text{ однако обновление динамических списков}$$

объектов в октантах может требовать значительных дополнительных расходов, особенно в тех случаях, когда значительная часть сцены попадает в область видимости. Оценки затрат на обновление динамических списков получены в предыдущем разделе и составляют

$$C2_B = \min((C_{Time} + C_{Cone})\gamma N, C_{Time}\beta R(L)N)$$

$$C2_C = C_{Time}\beta\gamma R(L)N$$

Следовательно, трудоемкость разрешения запроса поиска видимых объектов можно оценить как

$$C3_B = \min((C_{Time} + C_{Cone})\gamma N, C_{Time}\beta R(L)N) + 8C_{Cone}\frac{\beta(8^L - 1)}{7}$$

$$C3_C = C_{Time}\beta\gamma R(L)N + 8C_{Cone}\frac{\beta(8^L - 1)}{7}$$

В случае схемы временно-пространственной декомпозиции оценка трудозатрат должна учитывать глубину дерева на текущий момент времени $1 \leq L' \leq L$. Поскольку данная схема предусматривает поддержку визуального представления на текущий момент времени, затраты оцениваются как

$$C3_A = 8C_{Cone}\frac{\beta(8^{L'} - 1)}{7}$$

4.4. Анимационный запрос (Q4)

Анимационный запрос предполагает одновременное изменение положения камеры и проектного времени. Поэтому его можно рассматривать как композицию запросов Q2 и Q3. В случае схемы А трудоемкость выполнения запроса оценивается как сумма затрат на разрешение вспомогательных запросов:

$$C4_A = C2_A + C3_A$$

Для схем В и С трудоемкость разрешения анимационного запроса совпадает с затратами на выборку объектов в области видимости. Действительно, динамические списки объектов в видимых октантах обновляются уже в ходе разрешения запроса на выборку видимых объектов. Таким образом, имеет место

$$C4_B = C3_B$$

$$C4_C = C3_C$$

5. Сравнительный анализ

Сравним три представленные схемы индексации с учетом требований, предъявляемых к производительности разрешения типовых запросов. Сравнительный анализ вычислительных затрат позволяет сформулировать рекомендации по эффективному применению схем индексации в приложениях визуального моделирования, работающих с масштабными индустриальными проектами. Оценки сложности, полученные для предложенных схем, отражены в таблице 1.

Прежде всего, необходимо отметить, что стоимость развертывания индексов значительно варьируется для различных схем. Асимптотические оценки

сложности построения временного дерева совпадают для всех схем и составляют $O(N \log N)$. Оценки сложности развертывания октального дерева в схемах событийной индексации и пространственно-временной декомпозиции составляют $O(N \log^2 N)$. В схеме временно-пространственной декомпозиции октальное дерево не содержит элементов перед началом моделирования и, следовательно, его построение не требует каких-либо затрат.

Реконструкция сцены на заданный момент времени может быть выполнена за $O(N \log^2 N)$. Однако, полученные асимптотические оценки различаются постоянным множителем. Наименее трудоемкой для разрешения этого типа запросов оказывается схема С.

QQ1	$C1_A = C_{Time} \log(N!)$ $C1_B = C_{Time} \log(N!) + C_{Box} R(L)N$ $C1_C = C_{Time} 8^L \log\left(\left(\frac{N}{8^L}\right)!\right) + C_{Box} R(L)N$
Q2	$C2_A = C_{Time} \gamma N + C_{Box} R(L') \gamma N$ $C2_B = \min((C_{Time} + C_{Cone}) \gamma N, C_{Time} \beta R(L)N)$ $C2_C = C_{Time} \beta \gamma R(L)N$
Q3	$C3_A = C_{Cone} \frac{8\beta(8^L - 1)}{7}$ $C3_B = C_{Cone} \frac{8\beta(8^L - 1)}{7} + \min((C_{Time} + C_{Cone}) \gamma N, C_{Time} \beta R(L)N)$ $C3_C = C_{Cone} \frac{8\beta(8^L - 1)}{7} + C_{Time} \beta \gamma R(L)N$
Q4	$C4_A = C2_A + C3_A$ $C4_B = C3_B$ $C4_C = C3_C$

Таблица 1. Вычислительная трудоемкость разрешения запросов с применением различных схем пространственно-временной индексации

Схема А оказывается наиболее подходящей для поиска объектов в области видимости, поскольку октальное дерево всегда актуализировано на текущее проектное время и соответствует визуальному представлению сцены, подлежащему анализу. Схема С выглядит более предпочтительно, чем схема В, поскольку коррекция динамических списков объектов выполняется несколько эффективней за счет того, что события уже приписаны соответствующим октантам.

Схемы пространственно-временной декомпозиции и событийной индексации наиболее хорошо подходят для разрешения анимационных запросов, связанных с одновременным изменением камеры и проектного времени. По сложности разрешения анимационный запрос эквивалентен поиску объектов в заданной области, поскольку анализу и обработке подлежат те же самые видимые октанты. При использовании схемы временно-пространственной декомпозиции с необходимостью обновляется все октальное дерево. Суммируя вышесказанное, каждая из представленных схем обладает собственными достоинствами и недостатками.

В качестве рекомендаций для выбора схемы индексации, релевантной особенностям конкретного приложения, можно предложить следующие:

- в приложениях, реализующих развитые средства навигации и методы пространственно-временной верификации проектов, целесообразно применение схемы А;
- для приложений, ориентированных на событийное моделирование и предполагающих быструю пространственно-временную реконструкцию и анализ цепочек событий, предпочтительно использовать схему В;
- приложения с превалирующей анимационной функциональностью наиболее эффективно реализуются с применением схемы С.

Следует отметить, что обсуждаемые приложения консолидируют в себе функции визуального моделирования и календарно-сетевого планирования проектов и предполагают эффективное исполнение всех упомянутых выше типов запросов. Схема временно-пространственной декомпозиции представляется наиболее перспективной в этом случае, поскольку обеспечивает сбалансированные затраты на их разрешение.

6. Заключение

Таким образом, в работе обсуждены проблемы эффективности и масштабируемости, возникающие при построении систем визуального моделирования масштабных промышленных проектов. Возможный подход к их решению состоит в применении пространственно-временной индексации проектных данных. В работе предложены и исследованы три альтернативные схемы, учитывающие особенности пространственно-временной когерентности сцен и обеспечивающие быстрое разрешение типовых запросов, связанных с развертыванием и обновлением индексов, реконструкцией сцен, поиском

видимых объектов и анимацией динамических сцен. Для предложенных схем и выделенных типов запросов описаны алгоритмы исполнения запросов и получены оценки их вычислительной сложности. Полученные оценки подтверждают эффективность и перспективность предложенных схем индексации, а выработанные рекомендации помогают в их практической реализации.

Список литературы

- [1] BIM, GSA, "GSA Building Information Modeling Guide Series 04 - 4D Phasing" US General Services Administration, Public Building Service, Technical Report 2009.
- [2] Heesom, D., Mahdjoubi, L. Trends of 4D CAD applications for construction planning.// *Construction Management and Economics*, 22, 2004. — с. 171-182.
- [3] Sriprasert, E., Dawood, N. Requirements identification for 4D constraint-based construction planning and control system.// *Conference Proceedings - Distributing Knowledge in Building* — University of Teeside, Middlesbrough, 2002.
- [4] Visualization for decision making in construction planning. Visualization and intelligent design in engineering and architecture. Retik, A.; J.J. Connor et al. — New York, Elsevier Science, 1993. — с. 587-599.
- [5] Seliga, C. "Revel Selects Synchro for \$2 Billion Atlantic City Casino Project." *Prime Newswire June*, 2007.
- [6] Jimenez, P., Thomas, F., Torras, C. 3D collision detection: a survey.// *Computers and Graphics*, 25, 2001. — с. 269-285.
- [7] Klosowski, J.T., Held, M., Mitchell, J. S. B., Sowizral, H., Zikan, K. Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of k-DOPs.// *Visualization and Computer Graphics*, IEEE Transactions on Volume 4, Issue I, 1998. — с. 21-36.
- [8] Finkelstein, A., Jacobs, C. E., Salesin, D. H. Multiresolution video.// *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 1996. — с. 281-290.
- [9] Zhiyan, D.Y.J., Chiang, H.W.S. Out-of-core volume rendering for time-varying fields using a space-partitioning (SPT) tree.// *Visualizatin Symposium, Pacific Vis '09*, 2009. — с. 73-80.
- [10] Shen, H.W., Chiang, L.J., Ma, K.L. A fast volume rendering algorithm for time-varying field using a time-space partitioning (TSP) tree.// *In Proceedings of IEEE Visualization*, 1999. — с. 371-377.
- [11] Semenov, V.A., Kazakov, K.A., Zolotov, V.A., Jones, H., Jones, S. Combined strategy for efficient collision detection in 4D planning applications.// *Computing in Civil and Building Engineering* — Nottingham, UK, June 2010. — с. 31-39.
- [12] Золотов, В.А., Семенов, В.А. Исследование и развитие метода декомпозиции для анализа больших пространственных данных.// *Труды Института Системного Программирования*, 25, 2013. — с. 121-166. DOI: 10.15514/ISPRAS-2013-25-8.
- [13] Shagam, J., Pfeiffer, J. "Dynamic Irregular Octrees" NMSU-CS-2003-004, Technical Report 2003.
- [14] Sudarsky, O., Gotsman, C. Dynamic Scene Occlusion Culling.// *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 5, 1, 1999. — с. 13-29.
- [15] Whang, J.W., Song, J.W., Chang, J.Y., Kim, J.Y., Cho, W.S., Park, C.M., Song, I.Y. Octree-R: An adaptive octree for efficient ray tracing.// *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1, 4, 1995. — с. 343-349.

Effective spatio-temporal indexing methods for visual modeling of large industrial projects

V.A. Zolotov, V.A. Semenov

ISP RAS, Moscow, Russia)

{vladislav.zolotov, sem}@ispras.ru

Abstract. As opposed to traditional project planning and scheduling methods, 4D modeling technologies allow performing more comprehensive analysis taking into account both spatial and temporal factors. Such analysis enables to identify critical issues in early design and planning stages and to save significantly on the total project implementation costs. Unsurprisingly that there is a large interest to these emerging technologies and both free and commercial systems have been recently developed and applied in different industrial domains. However, being applied to large industrial projects and programs, most systems face significant problems relating to performance degradation and limited interactive capabilities what ultimately neglects the key benefits of visual 4D modeling technologies. In this paper a promising approach to rising up the performance and scalability of 4D modeling applications by means of indexing project data has been discussed. Three alternative indexing schemes have been proposed and described in conformity to the features of spatio-temporal coherence of arising dynamic scenes. These schemes have been investigated against the efficiency criteria to resolve typical requests connected with deployment and updates of indexes, reconstruction of scenes, analysis of visible objects, and animation of dynamic scenes. Conducted computational complexity analysis and obtained asymptotic estimates confirm the efficiency of the proposed indexing schemes and cause their introduction in industrial practice. Recommendations on their practical use have been also provided.

Keywords: 4D modeling, spatial indexing, binary search trees, octrees, computational complexity

References

- [1] BIM, GSA, "GSA Building Information Modeling Guide Series 04 - 4D Phasing" US General Services Administration, Public Building Service, Technical Report 2009.
- [2] Heesom, D., Mahdjoubi, L. Trends of 4D CAD applications for construction planning. *Construction Management and Economics*, 22, 2004, pp. 171-182.
- [3] Sriprasert, E., Dawood, N. Requirements identification for 4D constraint-based construction planning and control system. *Conference Proceedings - Distributing Knowledge in Building*, University of Teeside, Middlesbrough, 2002.
- [4] *Visualization for decision making in construction planning. Visualization and intelligent design in engineering and architecture.* / Retik, A.; J.J. Connor. New York, Elsevier Science, 1993, pp. 587-599.
- [5] Seliga, C. "Revel Selects Synchro for \$2 Billion Atlantic City Casino Project." *Prime Newswire June*, 2007.
- [6] Jimenez, P., Thomas, F., Torras, C. 3D collision detection: a survey. *Computers and Graphics*, 25, 2001, pp. 269-285.

- [7] Klosowski, J.T., Held, M., Mitchel, J. S. B., Sowizral, H., Zikan, K. Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of k-DOPs. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on Volume 4, Issue 1*, 1998, pp. 21-36.
- [8] Finkelstein, A., Jacobs, C.E., Salesin, D.H. Multiresolution video. *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 1996, pp. 281-290.
- [9] Zhiyan, D. Y. J., Chiang, H. W. S. Out-of-core volume rendering for time-varying fields using a space-partitioning (SPT) tree. *Visualizatin Symposium, Pacific Vis '09*, 2009, pp. 73-80.
- [10] Shen, H.W., Chiang, L.J., Ma, K.L. A fast volume rendering algorithm for time-varying field using a time-space partitioning (TSP) tree. *In Proceedings of IEEE Visualization*, 1999, pp. 371-377.
- [11] Semenov, V.A., Kazakov, K.A., Zolotov, V.A., Jones, H., Jones, S. Combined strategy for efficient collision detection in 4D planning applications. *Computing in Civil and Building Engineering*. Nottingham, UK, June 2010, pp. 31-39.
- [12] Zolotov, V.A., Semenov, V.A. Issledovanie i razvitie metoda dekompozitsii dlya analiza bol'shikh prostranstvennykh dannyykh [On application of spatial decomposition method for large data sets indexing]. *Trudy ISP RAN [The Proceedings of ISP RAS]*, 2013, vol 25, pp. 121-166. DOI: 10.15514/ISPRAS-2013-25-8. (in Russian).
- [13] Shagam, J., Pfeiffer, J. "Dynamic Irregular Octrees" *NMSU-CS-2003-004*, Technical Report 2003.
- [14] Sudarsky, O., Gotsman, C. Dynamic Scene Occlusion Culling. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 5, 1, 1999, pp. 13-29.
- [15] Whang, J.W., Song, J.W., Chang, J.Y., Kim, J.Y., Cho, W.S., Park, C.M., Song, I.Y. Octree-R: An adaptive octree for efficient ray tracing. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1, 4, 1995, pp. 343-349.