

С.В. ЕРЕМЕЕВ, Ю.С. ФОМИЧЕВ

**Анализ алгоритмов представления
 nD объектов**

Муромский институт
(филиал) ФГБОУ ВО
«Владимирский
государственный
университет имени
А.Г. и Н.Г. Столетовых»,
г. Муром

В статье рассмотрены проблемы отдельной трактовки уровней детализации в моделях городов, управления и объединения всех уровней детализации в единое целое. Рассмотрены существующие структуры данных, которые могут быть использованы для таких nD моделей. Проанализированы четыре схемы представления nD объектов на примере связывания трех уровней детализации дома в $2D$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Владимирской области в рамках научного проекта № 17-47-330387.

Ключевые слова: комбинаторные карты; клеточные комплексы; уровни детализации; nD объекты; геоинформационные системы.

Введение

В настоящее время область геоинформационных систем активно развивается, разрабатываются новые структуры данных и алгоритмы для работы с картами. Вместе с этим появляются не только новые возможности, но и трудности, связанные с обработкой информации. Одной из таких проблем является отдельная трактовка уровней детализации в моделях городов. Управление несколькими уровнями детализации и переключение между ними тоже является актуальной проблемой в компьютерной графике. В этой статье рассмотрены возможные способы решения этих проблем.

На данный момент различные уровни детализации 3D-моделей городов существуют как отдельные объекты, явно несвязанные друг с другом. Хранение, модификация и анализ таких моделей не оптимальны и имеют некоторые ограничения. Трудности возникают на этапе выполнения запросов через разные уровни детализации и при поддержке согласованности разных уровней после обновлений [1]. К тому же разные уровни бывают реализованы с разной точностью и сложностью структур. Уровни детализации рассматриваются как отдельные объекты и не поддерживают объединение между собой, а более высокие уровни детализации могут не состоять из частей более низкого уровня. Это приводит к проблеме отсутствия связей при масштабном переходе, например, отсутствует связь о том, что отдельное дерево на высоком уровне детализации может трансформироваться в лес при переходе на более низкий уровень.

Объединение уровней детализации

Одним из вариантов решения рассмотренных задач является интеграция всех уровней детализации трехмерной модели в одну согласованную четырехмерную модель. В результате такого объединения получаем nD гиперкуб, в котором масштаб рассматривается как еще одно измерение, перпендикулярное трем пространственным. Все уровни детализации интегрированы в саму структуру данных nD модели (рис. 1).

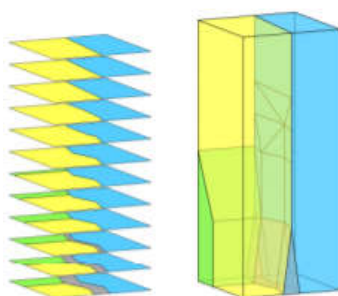


Рис. 1. Пример интеграция 2D пространства и оси уровней детализации в 3D структуру [1].

Это дает возможность определять семантические связи масштаба, извлекать из $(n+1)D$ nD модели на разных уровнях детализации, что позволяет выполнять плавные операции масштабирования или выбирать более подходящие уровни для

экрана, на котором они просматриваются. Данный подход позволяет иметь доступ к полной топологической информации, тем самым связи между объектами никогда не теряются и даже если объект исчезает, к нему все равно можно обратиться. Появляется возможность выполнять запросы по всем измерениям, например, чтобы определить, являются ли два объекта одинаковыми. Тем самым, если один объект полностью идентичен другому, но он большего масштаба, то установить такую связь, рассматривая уровни детализации по отдельности, невозможно.

Для объединения нескольких отдельных представлений, хранящихся в виде независимых наборов данных, сначала необходимо найти соответствия между объектами на разных уровнях детализации [2]. Эти объекты могут быть связаны с помощью различных структур, таких как: иерархические, топологические и многомасштабные отношения или вложенные карты. Простые схемы связывания работают с помощью автоматического обобщения, тем самым, создавая менее детальные, обобщенные версии модели. Когда соответствия между объектами на разных уровнях детализации известны, они могут быть связаны в процессе обобщения. Чтобы найти эти соответствия, используют методы сопоставления карт, которые могут учитывать геометрию, топологию и семантику объектов. Некоторые методы сопоставляют объекты путем вычисления коэффициента совместимости, полученного из сходства геометрии с соседними объектами. После обнаружения идентичных геометрий в нескольких уровнях детализации одного и того же объекта применяют повторное использование для уменьшения размера файла.

Структуры данных для nD модели

Существует несколько структур данных, которые могут быть использованы для хранения nD модели в компьютере. Наиболее перспективным вариантом является использование векторно-топологических структур данных. Некоторые из этих структур предполагают разбиение всех объектов на геометрические симплексы, образующие симплициальный комплекс. Такие структуры, как правило, концептуально просты и легки в реализации. Однако для разбиения каждого объекта на симплексы

необходимо использовать соответствующую триангуляцию, которую очень трудно реализовать более чем в трех измерениях, поскольку не существует известного доступного программного обеспечения. Поэтому имеют преимущество упорядоченные топологические модели, которые способны представлять более общие клеточные комплексы [3] с использованием внутренней структуры симплициального комплекса. Генерализованные карты и структура ячейка-кортеж способны хранить большой класс клеточных комплексов, в том числе многообразие объектов произвольной размерности не зависимо от ориентации. Они были реализованы в библиотеках и программном обеспечении MoKa2 и Gocad3. Комбинаторные карты [4] требуют определения ориентации объектов, но используют половину пространства хранения обобщенных карт. Они были реализованы в библиотеках CGAL4 и CGOGN5.

Алгоритмы построения nD модели

Рассмотрим два алгоритма для построения nD модели. Первый вариант, это когда объекты остаются относительно неизменными на протяжении всех уровней детализации, модель следующего уровня $(n+1)D$ можно вытянуть из nD , создавая простые призматические объекты. В этом случае используется алгоритм экструзии [5] (рис. 2), в котором для построения $(n+1)$ мерной модели объектов используется nD модель каждой фигуры и значение ее высоты. Конечный результат представляет собой n -мерный клеточный комплекс, где каждая k -клетка во входящем клеточном комплексе была преобразована в две k -клетки, соответственно принадлежащие основанию и вершине, и призматическим $(k + 1)$ - клеткам, лежащим между ними. Поэтому экструзия k -мерного вложения приводит к двум k -вложениям основанию и вершине и одному $(k + 1)$ вложению между ними. Этот метод плохо подходит для реализации, так как уровни детализации должны иметь одинаковую топологию, что редко встречается на практике.

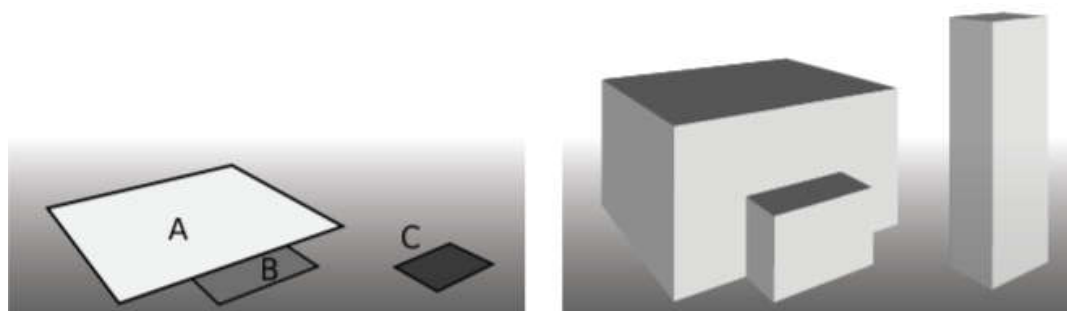


Рис. 2. Пример работы алгоритма экструзии [5].

Второй подход является более общим и подходящим для реальных случаев, он позволяет использовать произвольные клеточные комплексы, которые были созданы с использованием правил связывания. Он основан на произвольно сформированной $(k+1)$ мерной модели, в которой отдельные грани и объемы на границах модели постепенно строятся и связываются. Все ограничивающие объемы, соединяющие две модели должны быть созданы, начиная с определения всех необходимых координат. Например, для построения 4D модели будут определены координаты (x,y,z,l) , где (x,y,z) - это три пространственных измерения, а l - это точка на оси уровней детализации. Объекты должны быть соответствующим образом связаны друг с другом, сохраняя все топологические отношения между ними.

Анализ метода работы с моделью города

Здания в 3D-модели города часто моделируются в нескольких уровнях детализации. Например, в стандарте CityGML можно хранить пять отдельных уровней детализации от 2D-контура здания до представления, где окна, двери, стены и даже внутренние объекты детально смоделированы. Эти представления в большинстве случаев не являются производными от наиболее прорисованного уровня детализации, например, как с методами обобщения, но они собираются с помощью различных методов, часто для разных целей, и, следовательно, в результате представления не обязательно имеют легко обнаруживаемые соответствия. Один и тот же объект может быть слегка смещен на разных уровнях, или стать совокупностью других объектов, и может быть смоделирован совершенно по-разному. Построение 4D модели

из существующих уровней 3D модели города состоит из трех этапов:

1. Идентификация соответствующих ячеек 0D-3D;
2. Соединение ячеек путем создания новых ячеек 1D-4D;
3. Построение 4D клеточного комплекса, используя все 0D-4D ячейки.

Построение 4D-модели из последовательности 3D-моделей во многом зависит от идентификации соответствующих 0, 1, 2 и 3-ячеек между 3D-моделями. Целью этой идентификации является создание отображения между 3D-моделями, которое сохраняет топологические отношения между элементами в моделях, чтобы создать допустимую 4D-модель. В результате получаем то, что 3D-модели объектов на разных уровнях детализации сопоставляются между собой с самого высокого уровня до нижнего уровня детализации. Кроме того, эти соответствия часто не приводят к однозначному сопоставлению: группы расположенных рядом ячеек в одной модели чаще всего на самом высоком уровне сопоставление идет с одной ячейкой в другой модели. Идентификация совпадающих ячеек должна производиться с использованием комбинации атрибутов, следующих в порядке предпочтения и использующих семантическую информацию, хранящуюся в ячейках. Когда существует взаимно однозначное отображение между двумя ячейками, все их топологические отношения сохраняются, это отображение называется изоморфизм [6].

Важно вычислить соответствия, используя ограничения, которые обычно сохраняют относительные положения и топологические отношения между ячейками. При сопоставлении ячеек необходимо разбиение k -ячейки на несколько k -ячеек путем добавления ячеек меньших размеров таким образом, чтобы не изменять геометрию ячейки. Например, грань можно разбить на несколько граней, добавив вершину внутри и создав ребра, связывающие ее с вершинами грани. Таким образом, можно получить два изоморфных клеточных комплекса и непосредственно обеспечить взаимно однозначное отображение между ними.

Связав найденные совпадения между ячейками, которые математически определяют карту клеточного комплекса 3D-моделей, можно построить 4D-клеточный комплекс. Для этого может

потребуется создать или изменить ячейки 0D–3D во входных клеточных комплексах, а также создать новые ячейки 1D–4D, которые лежат между клеточными комплексами. Полученный 4D-клеточный комплекс затем внедряется в 4D-пространство, назначая новые 4D-координаты для каждой точки.

Методы связывания объектов

Рассмотрим четыре базовые схемы связывания на примере 2D, показанные на рисунке 3. Зеленым пунктиром показаны объекты, полученные путем извлечения среза между уровнями детализации. Красные пунктирные линии отражают ячейки, которые необходимо добавить для получения 3D представления.

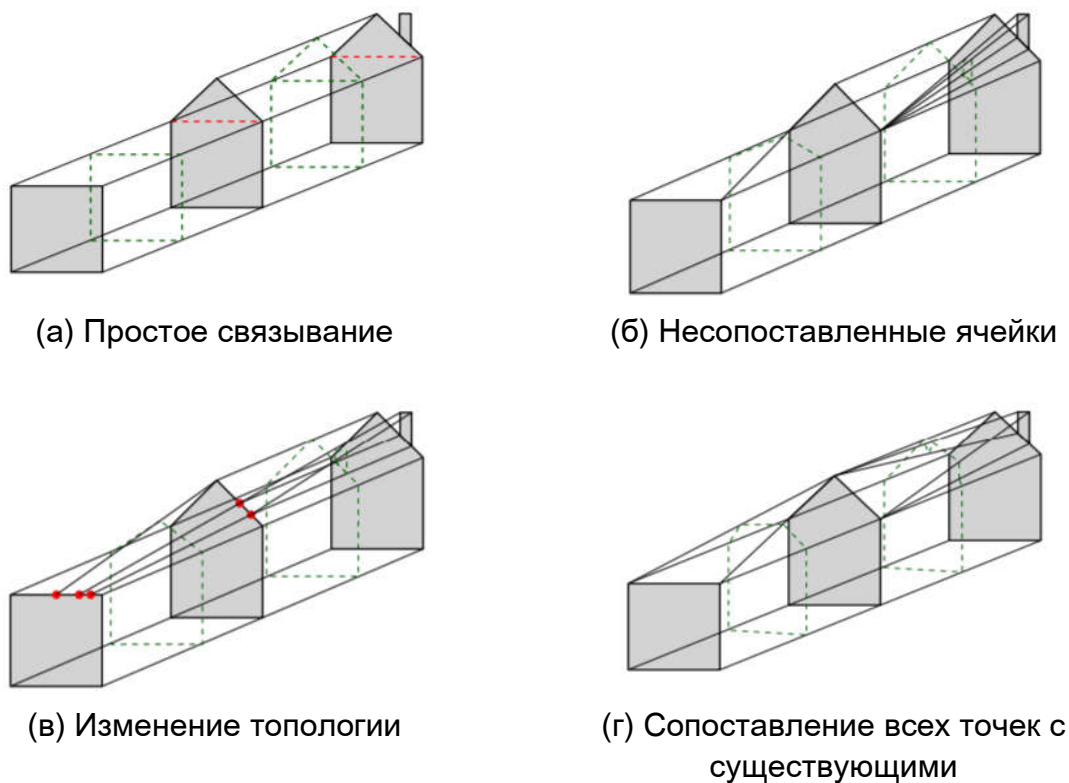


Рис. 3. Четыре схемы связывания для трех уровней детализации дома в 2D [6].

Первый метод (рис. 3 (а)) - это простое связывание соответствующих точек. Связи строятся между соответствующими точками объекта на двух разных уровнях детализации. Если точка не имеет соответствующей, то она игнорируется. Хотя это позволяет нам легко построить 4D-клеточный комплекс в тех случаях, когда все точки в нижнем уровне детализации имеют соответствующую ячейку в более высоком, если это не так,

результат будет состоять из неполного 4D-клеточного комплекса. Для обеспечения полной ячейки часто требуется разбиение, его можно выполнить с помощью геометрических пересечений, это показано красной пунктирной линией. Следует отметить, что перенос этой схемы на более высокие размеры очень затруднен, поскольку отсутствуют инструменты обработки пересечений [7]. Заметим, что, если брать срез между уровнями, результатом является именно нижний уровень.

Во втором методе, (рис. 3 (б)) не сопоставленные ячейки сворачиваются в существующие без внесения изменений в 3D-модели, что является значительным преимуществом, так как нет необходимости выполнять сложные геометрические операции и размер комплекса точек будет меньше, чем размер комплекса, когда они изменяются. Вместо геометрических операций, части объекта в высших моделях связываются с совпавшими частями в нижних моделях иногда меньшего размера с сохранением геометрических и топологических ограничений. В результате некоторые ячейки будут свернуты, например, ребро, может быть сопоставлено с вершиной, и они должны быть связаны с осторожностью, чтобы получить правильный 4D-клеточный комплекс. Основной задачей здесь является обеспечение того, чтобы клетки сохранили свои топологические отношения и правильно сформировали разделение пространства, во избежание пересечений ячеек между собой. Необходимо учитывать, что даже если геометрически построен корректный 4D-клеточный комплекс, 3D-объект, полученный путем выборки среза между уровнями детализации, может не соответствовать реальности. Если присмотреться, то можно увидеть, как дымоход на рисунке 3 (б) становится все меньше и ближе к правому карнизу крыши, это особенность данного типа связи.

Третий метод, заключается в изменении топологии. Для обеспечения соответствия между всеми ячейками можно разделить или объединить их таким образом, чтобы топология объектов была одинаковой. Операции удаления и сжатия [8] используются для упрощения сложных объектов, чтобы они соответствовали более простым. Можно сначала определить для каждой клетки на низком уровне соответствия с клетками на высших уровнях, а затем разбить ячейки в нижней модели, так чтобы их топология осталась

такой же, как и в высшей модели, с которой они связаны. На рисунке 3 (в) на нижнем уровне сначала нужно найти совпадающую зону с точками крыши верхнего уровня, которая затем должна быть разделена с помощью вставки новых вершин. Все представления объекта, в которых используется этот подход, будут иметь одинаковую топологию. Это потребует больших затрат памяти и приведет к возможным конфликтам ячеек, например, когда несколько вершин в одном месте. Геометрические операции, необходимые для разделения ячеек, являются довольно сложными. Если взглянуть на выборку срезов между уровнями детализации, то можно заметить, что она приводит к другому представлению объекта, в котором он плавно превращается в следующий уровень детализации. Например, вершина крыши медленно опускается по мере перехода к нижнему уровню детализации.

Четвертый метод заключается в сопоставлении всех ячеек с существующими, как и во втором методе, но этот не требует изменения топологии объектов. Основное отличие его заключается в том, что клетки в высших моделях не обязательно пропадут в нижней модели, они соответствуют одной или более ячейкам любого размера при сохранении определенных геометрических и топологических ограничений. На рисунке 3 (г) можно заметить, что вершина крыши на средней модели соответствует верхнему ребру на самом низком уровне, а два ребра, представленные на среднем уровне детализации крыши, соответствуют двум вершинам верхнего ребра на нижнем уровне. Таким образом, в срезе получаем усеченную крышу, имеющую 3 ребра. Это достигается путем сопоставления сначала всех ячеек, которые имеют четкое соответствие, а затем сопоставляя группы не связанных ячеек, сохраняя топологические отношения между ними. Например, можно сначала сопоставить основание и стены домов в нижней и средней моделях детализации, затем сопоставить ребра крыши средней модели с вершинами на нижней. Дымоход выстраивается путем совмещения с правым карнизом. В результате печная труба медленно сходится к крыше в средней модели детализации.

Заключение

В статье рассмотрена проблема отдельного представления уровней детализации в nD моделях. Выявлены основные

недостатки при использовании такого подхода. Рассмотрен один из возможных вариантов решения этой проблемы в виде объединения всех уровней детализации в единое целое, а именно представление модели с разными уровнями детализации с помощью единой структуры данных. Проанализирован пример объединения уровней детализации, в котором отдельные 2D полигоны преобразуются в 3D куб. Выявлены основные преимущества данного подхода, среди которых можно выделить возможность устанавливать семантические и топологические связи между объектами и быстрый доступ ко всем объектам на любом уровне детализации. Рассмотрены существующие структуры данных, которые могут быть использованы для таких nD моделей. Проанализированы алгоритмы построения nD модели, такие как метод вытягивания геометрических объектов - экструзия и подход на основе клеточных комплексов. Рассмотрен основной принцип в работе с 3D моделью города и вариант объединения таких моделей в 4D. Проанализированы четыре схемы представления nD объектов на примере связывания трех уровней детализации дома в 2D. Выявлены основные преимущества и недостатки каждого метода. В целом можно отметить, что в разных типах задач выигрывают всегда разные методы, это говорит о том, что каждый актуален для конкретного типа задач.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Владимирской области в рамках научного проекта № 17-47-330387.

Литература

1. Jantien Stoter, Hugo Ledoux, Martijn Meijers and Ken Arroyo Ohori. Integrating scale and space in 3D city models.: Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS, 2012, pp. 7–10.
2. Peter van Oosterom. Variable-scale topological data structures suitable for progressive data transfer.: International Journal of Geographical Information Science, 2014, pp. 331–346.
3. Ken Arroyo Ohori, Hugo Ledoux, Filip Biljecki and Jantien Stoter. Modelling a 3D city model and its levels of detail as a true 4D model.: ISPRS International Journal of Geo-Information, 2015, pp. 1055–1075.
4. Ken Arroyo Ohori, Hugo Ledoux, Guillaume Damiani. Constructing an n-dimensional cell complex from a soup of $(n - 1)$ - dimensional faces.: First International Conference, ICAA 2014, pp. 37–48.

5. Ken Arroyo Ohori, Hugo Ledoux. Using Extrusion to Generate Higher-dimensional GIS Datasets.: International Conference on Advances in Geographic Information Systems, 2013, pp. 398–401.
6. Stéphane Gosselin, Guillaume Damiand, and Christine Solnon. Efficient search of combinatorial maps using signatures.: Theoretical Computer Science, 2011, pp. 26–41.
7. Peter Hachenberger. Boolean Operations on 3D Selective Nef Complexes Data Structure, Algorithms, Optimized Implementation, Experiments and Applications.: PhD thesis, Saarland University, 2006, pp 64–99.
8. Guillaume Damiand and Pascal Lienhardt. Removal and contraction for n-dimensional generalized maps.: International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery, 2003, pp. 408–419.
9. Еремеев С.В., Андрианов Д.Е., Титов Д.В. Метод представления информации о топологии карты в структуре идентификаторов пространственных объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. №2. 2015. С. 99-103.
10. Еремеев С.В., Сельцова Е.А. Алгоритм топологического анализа пространственных структур в геоинформационных системах // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2017. №1. С. 16-27.
11. Eremeev S., Kuptsov K., Romanov S. An Approach to Establishing the Correspondence of Spatial Objects on Heterogeneous Maps Based on Methods of Computational Topology. In: van der Aalst W. et al. (eds) Analysis of Images, Social Networks and Texts. AIST 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10716. Springer, pp. 172–182.