

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ НАУЧНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

В.Л. Авербух

Институт математики и механики УрО РАН,

г. Екатеринбург

e-mail: averbukh@imm.uran.ru

Аннотация

В работе описаны задачи научной визуализации. На примерах показана необходимость разработки специализированных систем и описаны тенденции в методах специализации. Приведена методология разработки специализированных систем компьютерной визуализации. Описан проект разработки система интерактивной визуализации параллельных вычислений.

1 Введение. Задачи научной визуализации

Научная визуализация являлась одной из главных целей применения систем машинной (компьютерной) графики с 60-ых годов. Первые пакеты машинной графики, в частности, широко известные отечественные ГРАФОР [5] и СМОГ [14] содержали значительный набор средств, направленных именно для представления результатов численного моделирования, что естественно, если вспомнить, где эти пакеты были разработаны (а именно, в крупнейших исследовательских центрах прикладной математики, в Институте Прикладной Математики АН СССР и Вычислительном Центре СО АН СССР, соответственно). ГРАФОР и СМОГ содержали не только (и не столько) примитивы вывода, но и богатые наборы функций, осуществлявших графическое представление математических объектов.

К середине 80-х годов сложилась ситуация, когда, с одной стороны, появилась потребность в создании специализированных средств научной визуализации для представления результатов супервычислений в самых различных областях знаний, а с другой — были разработаны аппаратные, алгоритмические и программные средства компьютерной графики, позволявшие обеспечить качественное (вплоть до фотореализма) отображение изучаемых объектов и феноменов.

Официально научная визуализация как самостоятельная дисциплина оформилась после публикации в ноябре 1987 г. доклада “Визуализация в научных вычислениях” [19]. Доклад содержал три основные части:

- определение визуализации;
- проблемная область визуализации;
- рекомендации для инициативы в научной визуализации.

Этот доклад положил начало программе в области научной визуализации, которую начали осуществлять ученые и специалисты США с 1987 г. и, кстати говоря, успешно выполнили через короткое время. (В приложениях к докладу был приведен обширный список уже существовавших на тот момент разработок в этой области.) Вскоре появились спецвыпуски журнала *Computer* со статьями (а, по сути, отчетами) ученых из ведущих исследовательских центров США, в которых рассказывалось о системах визуализации, применяемых в различных областях науки (например, физика плазмы, науки о Земле, военно-морские исследования, etc.). Отметим, что работы в области научной визуализации и по сей день развиваются в русле тех идей и рекомендаций, которые были предложены более 15 лет назад.

Официальное признание новой дисциплины и потребности научных вычислений вызвали настоящий бум в разработке средств научной визуализации. Регулярно проводятся международные, региональные и национальные конференции по визуализации. Выпускаются научные журналы по этой тематике.

При анализе средств визуализации следует различать примеры визуализации и системы визуализации.

Системы визуализации могут иметь дело с произвольными модельными объектами из некоторого определенного класса. Примеры визуализации являются или сделанной вручную демонстрацией, или достаточно гибкой визуализацией особенностей некоторого модельного объекта. При этом следует отметить, что система визуализации может быть проще мощного примера, как по функциям, так и по использованным графическим средствам. Следует отметить две тенденции развития систем визуализации. С одной стороны — разработка универсальных средств визуализации, а с другой — специализация по всем направлениям, вплоть до создания специальных графических станций с реализацией для данного случая графическим алгоритмическим и программным обеспечением [12].

Таким образом, системы визуализации, в свою очередь, можно разделить на универсальные и специализированные, обслуживающие определенный класс пользователей и задач и содержащих свои методики визуализации.

Характерным примером универсальной системы визуализации служит *Open Visualization Data Explorer (DX)* [16], разработанный компанией IBM. (Первоначально эта система носила коммерческий характер, а в последствие стала доступна для свободного распространения.) Эта система характеризуется богатым набором средств визуализации и стандартных способов представления модельных сущностей — видов отображения. Кроме того, в состав DX входит набор неграфических функций, например, набор математических выражений, статистические функции, средства обработки изображений и пр. Важными являются реализованный в системе подход к описанию визуализации, основанный на потоке данных и поддерживающий конвейер визуализации (фильтрация, мэппирование, рендеринг). Для описания визуализации DX предлагает визуальный язык на базе потока данных.

Средства визуализации в пакетах прикладных программ, например, таких как *Matematika*, *Maple*, *MathCAD*, также можно рассматривать как универсальные системы визуализации. Те математические объекты, расчет которых можно описать средствами пакета, можно и визуализировать, используя имеющиеся приемы и виды отображения с фиксированными параметрами. Часть пакетов для описания визуализации использует визуальные языки на базе потока данных.

Важной особенностью универсальных систем является наличие типового набора

видов отображения для типовых математических объектов. Тем самым, они могут дать инструмент для разработки специализированной визуализации. Задача пользователя — так описать связь между модельными сущностями, которые необходимо визуализировать, и стандартными видами отображения, чтобы увидеть интересующие его особенности изучаемых объектов. Это зачастую требует от пользователя значительных усилий, а иногда вывод важных особенностей практически неосуществим. В принципе, при помощи универсальных систем можно отобразить любые математические объекты. Другой вопрос, какие усилия требуются от пользователя, причем не только (и не столько) при самой визуализации, сколько при интерпретации результатов. Вообще отметим, что полностью универсальных систем визуализации не существует. По сути, универсальные системы содержат некоторый стандартный набор (“универсальных”) видов отображения и приемов визуализации.

Специализированные системы облегчают работу пользователя, а, в случае исследования принципиально новых модельных объектов, только за счет их использования можно получить наглядное представление об их природе и особенностях.

2 Примеры специализированных систем научной визуализации

Наш опыт дает ряд примеров использования специализированных систем визуализации для обеспечения анализа и интерпретации данных, полученных при решении сложных задач. Применение универсальных систем не позволяло увидеть необходимые особенности объектов моделирования, а в ряде случаев и вообще каким-то образом вывести изображения. Знания, полученные от пользователей–математиков и касающиеся сущности и структуры изучаемых объектов, позволили разработать полезные средства визуализации.

2.1 Система визуализации построения максимальных стабильных мостов

Одной из первых еще в 90–х годах была построена система визуализации построения максимальных стабильных мостов в линейных дифференциальных играх. Средства визуализации отдельных мостов или системы мостов должны дать информацию об устройстве функции цены и ее особенностях. Под особенностями, в основном, понимаются нарушения гладкости, которые могут зарождаться и исчезать на сечениях трубки с течением времени. Чтобы получить представление о функции цены игры в целом, нужно обеспечить одновременное отображение нескольких трубок, построенных для разных значений цены. При этом на изображении должны восприниматься как конкретные мосты, так и вся структура. Разработка видов отображения для этой системы с использованием набора вложенных цветных прозрачных трубок, а также использование сечения трубок позволили решить поставленные задачи. Полученные от пользователей данные о природе математических объектов позволили за счет определенного утрирования визуально выделить малозаметные нарушения гладкости и разрывы непрерывности в решениях дифференциальных игр [1]. См. рис. 1.

2.2 Визуализация четырехмерных информационных множеств

Важную информацию о реакциях, протекающих при процессах динамического кинетического расщепления, можно извлечь из данных о кинетике их протекания. В частности, для оценки эффективности процесса необходимо знание скоростей его элементарных реакций. Для нахождения скоростей обычными статистическими методами требуется провести большое число экспериментов. Из-за высокой стоимости компонентов, участвующих в реакции, это весьма неэкономично. Поэтому была разработана параллельная программа для поиска скоростей, позволяющая обойтись малым числом экспериментов. При проведении химического опыта в определенные промежутки времени замеряются концентрации интересующих веществ. Затем строится математическая модель, описывающая поведение этих концентраций. Ее параметрами служат скорости протекания элементарных реакций. Некоторый набор скоростей считается допустимым, если при моделировании процесса расщепления концентрации веществ меняются в соответствии с экспериментальными данными. При этом учитываются погрешности замеров в эксперименте. Множество всех допустимых наборов скоростей есть информационное множество, которое в данном случае состоит из около миллиона четверок чисел. Таким образом, задача нахождения четверки скоростей элементарных реакций свелась к задаче нахождения информационного множества. Изучение геометрического строения этого множества позволило исследовать взаимосвязь элементарных реакций, участвующих в процессе расщепления. Так встает задача изучения геометрии информационных множеств, а вместе с ней — проблема их графического представления. Конкретно, требуется метод визуализации, с помощью которого можно было бы исследовать локальные и глобальные характеристики расположения множеств в четырехмерном пространстве. К ним относятся, например, локальное строение окрестностей, связность, выпуклость и ориентация в четырехмерном пространстве. Для получения всей информации о множестве недостаточно использовать какой-то один известный вид отображения многомерных множеств. Исходя из знаний об априорной структуре множеств и цели, поставленной перед визуализацией, был предложен ряд методов визуализации. В ходе консультаций с заказчиками—математиками среди предложенных видов отображения были выбраны приоритетные, которые легли в основу комбинированного метода и созданной системы многомерной визуализации. Был разработан комплексный подход визуализации, в основе которого лежит идея интерактивного взаимодействия с пользователем с использованием несколько видов отображения. При этом каждый вид отображения связан с другими, что позволяет проводить “навигацию” по множеству и извлекать все его необходимые свойства. Таким образом, в ходе реализации системы был предложен новый подход для представления информационных множеств, что в принципе решает задачу их представления [6], [7]. См. рис. 2.

2.3 Специализированная система визуализации для одной из задач оптимального управления

Источником постановки следующей задачи послужил поиск областей достижимости в одной из задач оптимального управления. Ряд причин, связанных с реализацией алгоритма, привел к тому, что вычисленные данные составляют порядка десятков миллионов, а то и миллиардов точек, хранимых в `bitmap`-формате. Пользователю—

математику необходимо изучать общий вид и внутреннюю структуру области достижимости для конкретной задачи. Очевидно, что огромный объем полученного расчетного материала потребовал использования средств трехмерной визуализации. Был создан комплекс программ, позволяющий провести фильтрацию данных не искажающую ни внешнюю и ни внутреннюю структуру объекта. Система позволяет отобразить как процесс построения области достижимости, так и сам объект в разных ракурсах. Программный комплекс состоит из набора утилит для работы с огромным облаком точек и его последующей визуализации. Данные обрабатываются на специализированном “конвейере визуализации” обработке, состоящем из следующих стадий:

- обработка исходных bitmap-файлов;
- вычисление освещенности;
- конвертирование в воксельный формат и создание структур хранения сцены;
- сглаживание воксельных объектов;
- конвертирование в полигональный формат.

В примере была рассмотрена так называемая сфера Лоренца, при расчете которой объем исходного файла составляет примерно 6,5 миллионов точек. В итоге получен графический объект, состоящий из около 40 000 полигонов. Ясно, что на данном этапе развития компьютерной техники невозможно интерактивно манипулировать миллионами точек в отличие от десятков тысяч полигонов. Таким образом, в результате разработки специализированной системы значительно уменьшился объем данных без потерь качества, что позволило изучать результаты численного исследования без излишних требований к аппаратным ресурсам [9]. См. рис. 3.

3 Тенденции в разработке специализированных систем визуализации

Существует несколько подходов к обеспечению специализации. В частности, возможна специализация систем по объектам визуализации. Например, система визуального вывода сеток, реализованная в Sandia Labs, позволяет осуществить различные методики вывода, в том числе с использованием технологий виртуальной реальности [17]. См. рис. 4. В [?] описана среда (по сути, комбинированный набор нескольких пакетов графических функций), в которой на основе методов volume visualization (визуализации объемов), решается целый ряд задач, связанных с исследованием одного их типов турбулентности. При этом возможно сравнение различных подходов к визуализации модельных объектов. Возможна реализация специализированных сред в которых на основе одной методики визуализации решается целый ряд проблем из различных отраслей знаний. Однако анализ показывает, что классификация систем визуализации проводится, прежде всего, по научным направлениям, для которых разрабатываются соответствующие системы. Имеет место подробная номенклатура отраслей научной визуализации, соответствующих научным отраслям и дисциплинам. Встречаются такие подразделы научной визуализации, как биомедицинская визуализация, химическая визуализация, визуализация аэро и гидродинамики, географическая визуализация и т.п.

При этом возможна разработка систем, пригодных для решения только одной, хотя и и мощной задачи. Уже упоминавшийся (и сравнительно старый — первой половины 90-х) пример [12] показывает, видимо, крайний вариант такой специализированной системы визуализации. Задача визуализации в этом случае заключается в выводе изоповерхностей результирующих данных физики взрыва, сгенерированных соответствующей программой. Результат работы этой программы - 300 000 000 вычислений ячеек, что составляет примерно 50 gigabytes на один дамп. Три дня работы установленного в Sandia National Laboratories суперкомпьютера ASCI Red могут дать 100 сжатых наборов данных, содержащих дампы, общим объемом порядка 350 Gb. В результате цикл обработки, включающий моделирование, визуализацию и анализ, был “втиснут” в 24 часа. При этом удалось достичь изучения изоповерхностей в реальном времени с использованием средств виртуальной реальности. Вывод одного кадра происходит примерно в 8 секунд. Для ускорения всего цикла работы были предприняты такие экстраординарные (по нашим критериям) меры, как установка новой 16-процессорной графической станции, замена каналов передачи графической информации, а также распараллеливание всех пригодных для этого алгоритмов визуализационного конвейера.

Интересно, что тенденция в такого рода специализации в настоящее время только усиливается. В этой связи отметим, что в Sandia National Laboratories устанавливается суперкомпьютер ASCI Red Storm, который можно рассматривать как специализированный вычислитель, в целом ориентированный на задачи газовой динамики.

Также в первой половине 90-ых годов в NASA для моделирования космических челноков (программа Space Shuttle) была разработана специализированная система Windtunnel [11]. Эта система, по сути, является системой визуализации для нужд аэродинамического моделирования. Характерным является, во-первых, огромная роль технологий виртуальной реальности в визуализации, во-вторых, неразрывная связь системы визуализации и мощной вычислительной модели, для которой система визуализации служит средством управления численным экспериментом.

Хотя сама система Windtunnel уже не эксплуатируется, но активно используются аналогичные идеи сочетания в системах визуализации технологий виртуальной реальности и традиционных методик визуализации (векторные поля, поля скоростей, изоконтуры и пр.), а также встраивания средств визуализации в мощные системы компьютерного моделирования. См. рис. 5.

Существует тенденция разработки пакетов визуализации, которые затем могут использоваться в рамках конкретных средств моделирования. Примером такого пакета является разработанный в нашей стране мощный визуализатор ScientificVR [4], который можно рассматривать как специализированное средство визуализации для задач газовой динамики (хотя в целом эта система достаточна универсальна).

В настоящее время через интернет доступен огромный объем материалов — многие сотни статей и отчетов, большое количество диссертаций, учебных текстов. Имеется информация о десятках изданных за рубежом монографий на темы научной визуализации.

Изучение статей, касающихся отдельных отраслей научной визуализации, позволяет уяснить, что каждое направление содержит свои (хотя иногда и совпадающие с другими отраслями) наборы моделируемых сущностей, объектов изучения и визуализации, методик выделения этих объектов, например, методики выделения изоповерхностей. (Иногда даже кажется, что для каждого направления существует своя машинная графика, как, например, фрактальные методы, которые используются при генерации береговых линий.)

Можно заключить, что для каждого подраздела визуализации, связанного с тем или иным научным направлением, характерны наиболее важные объекты визуализации, естественная образность, привычные виды отображения.

Изучение частного вопроса (например, проблемы визуализации потоков жидкости и/или газа) наталкивается на необходимость освоения десятков, если не сотен, текстов, среди которых быстро выявляются свои “классические” труды, работы с технически сложными подходами к получению изображений, интересные работы, описывающие практически применимые приложения [20], [15]. См. рис. 6.

4 Методология разработки специализированных систем компьютерной визуализации

Проведенные нами исследования и реализация конкретных систем позволили выявить методологию разработки специализированных систем компьютерной визуализации.

4.1 Приемы построения видов отображения

Прежде всего рассмотрим приемы построения видов отображения, полученные нами на базе опыта реализации целого ряда специализированных систем визуализации.

Отметим, что особенно сложно найти методы визуализации и соответствующую им систему видов отображения в тех случаях, когда для данной прикладной области не удастся подобрать естественную или привычную образность, тем более, когда она вообще отсутствует. Очевидно, что при визуализации четырехмерного информационного множества не существует естественной образности для многомерных множеств. В литературе описаны некоторые приемы представления четырехмерных множеств, однако, все они оказались неприемлемы для данного случая. После длительного анализа структуры множеств, целей моделирования и опыта представления многомерных объектов был предложен ряд методик визуализации четырехмерных множеств, среди которых были выбраны приоритетные виды отображения. Успех в данном случае связан с возможностью разделения координат четырехмерной точки на две сравнительно независимые пары, таким образом, что можно построить связанные между собой наборы видов отображения, представляющих двумерные и трехмерные проекции четырехмерного множества. Для лучшей интерпретации вводится специальный визуальный объект, так называемый, росток точки, связанный с представлением двумерных сечений множества, где секущая гиперплоскость задается с помощью выбора точек из двумерной проекции. Пользователь в интерактивном режиме выбирает одну точку проекции и наблюдает строение ее ростка, тем самым, получая возможность визуально оценить его конфигурацию. Можно говорить о таком приеме визуализации, как создание специальных визуальных объектов, не имеющих соответствия среди модельных объектов, но обеспечивающих их анализ и интерпретацию [7].

В системе визуализации построения максимальных стабильных мостов в линейных дифференциальных играх решения представляются в виде трубок, которые соответствует определенному значению цены игры. Трубка задается набором параллельных двумерных многоугольных сечений. Средства визуализации отдельных мостов или системы мостов должны дать информацию об устройстве функции цены и ее особенностях. Одним из видов отображения системы является восстановленная с помощью триангуляции по

контурам сечений поверхность. Разработанный алгоритм триангуляции позволяет за счет увеличения соответствующего угла подчеркивать негладкость поверхности трубки, представляющую особенности функции цены игры. Таким образом, в этом случае было использовано визуальное утрирование особенностей для их быстрого опознания [2]. См. рис. 1.

Большую роль в построении видов отображения играет поиск необходимой перспективы наблюдения, в которой необходимо строить визуальные объекты для их лучшего изучения. Необходим выбор системы координат, подбор ракурсов, типов освещения и пр. Может, например, оказаться полезным представление двумерной информации в трехмерном виде. Следует, однако, избегать возникновения артефактов визуализации и перспективы.

При построении графика функции цены дифференциальной игры в виде поверхности в трехмерном пространстве способ изображения ориентирован на случай, когда информация о функции цены поступает в виде набора фронтов — линий уровня функции цены, просчитанных с определенным шагом по времени. В ходе визуализации на основании двумерных ломаных, заданных своими вершинами, восстанавливается (на основе некоторых знаний о природе функции цены игры) поверхность. При этом алгоритм позволяет выделять места, где нарушается гладкость и непрерывность графика функции цены [10]. См. рис. 7

Другой вариант выбора перспективы был использован при визуализации моделирования одного из физических процессов. В данной модели имеет место огромный разброс числовых данных, который при визуализации приводит к значительному искажению вида поверхности. При этом в обычных координатах видны либо мелкие детали (порядка $10E-4$), либо крупные (порядка $10E+4$). Проблема совмещения на одном графике небольших (фоновых) значений и очень больших всплесков была решена с помощью часто применяемых в физике логарифмических преобразований, которые не искажают в сильной мере вида поверхности и дают хорошее представление о всем процессе в целом, то есть о его фоновых значениях и всех всплесках [2]. См. рис. 8.

Наиболее приятный для проектировщика вариант возникает, когда при компьютерном моделировании можно использовать естественную образность физической модели. Классическим примером этого является специализированная система “виртуальная аэродинамическая труба” [11], служащая, в частности, для визуализации компьютерного моделирования космического челнока. Однако использование естественной образности не избавляет от необходимости поиска специальных методик визуализации. См. рис. 5.

Например, в системе визуализации кинетики размножения и мутации вирусов необходимо по ходу одного анимационного фильма показать рост популяции вирусов от десятков и сотен особей до десятков и сотен тысяч объектов. Для решения используются приемы, заимствованные из кинематографа, такие как панорамирование, смена планов, наплыв. Кроме этого применяется имитация динамики роста в случае очень большого числа вирусов за счет колебания сплошной массы. Наряду с использованием естественной образности и кинематографических приемов используются привычные для исследователя графики и таблицы [2]. См. рис. 9. Вообще, в настоящее время при проектировании систем визуализации рекомендуется применение множественности видов отображения, показывающих разные аспекты изучаемого процесса с использованием различных перспектив и методик визуализации [18].

Во многих случаях следует говорить уже не только о проектировании набора последовательно или одновременно выводимых видов отображения, но о системе

связанных друг с другом видов отображения, использующих в единстве и взаимодействии графику, анимацию, таблицы. В этой связи отметим, что возможные способы взаимодействия с визуальными объектами должны проектироваться как часть комплексного вида отображения.

Как правило, в системах визуализации реализуются методы непосредственного манипулирования с визуальными объектами, находящимися в основном окне вывода. Однако при насыщении основного вида отображения дополнительной информацией, например, линиями уровня, наложенными на поверхности, манипуляции с визуальными объектами (изменение положения и ориентации объекта в трехмерном пространстве, масштаба вывода изображения и пр.) становятся затруднительными. В разработанной нами системе визуализации моделирования загрязнения окружающей среды было предложено использовать для таких действий специальное окно, упрощенно повторяющее основное. В дополнительном окне проводятся манипуляции, немедленно отображающиеся на основном изображении [2]. См. рис. 10

Как следствие единства методов визуализации различного назначения имеет место перенос методик представления, дрейф видов отображения между различными областями компьютерной визуализации. Например, методы визуализации и виды отображения переходят из систем научной визуализации в информационные визуальные системы, а из информационной визуализации в системы визуализации производительности параллельных систем. Одновременно с этим в компьютерную визуализацию приходят методы, первоначально получившие распространение в компьютерных развлечениях и играх. Так, в конце 80-ых годов методы виртуальной реальности (аппаратура для которой, в свою очередь, заимствована из арсенала обучения летчиков и астронавтов) были использованы в шоу-бизнесе. Затем, в 90-ых началось их активное использование в научной визуализации, а следом в системах информационной визуализации. Тогда же в конце 80-ых, начале 90-ых годов были разработаны системы визуальной отладки производительности параллельных систем, в которых методы, ранее применяемые в статистической графике, были использованы при разработке видов отображения для данных о производительности параллельных программ.

Вместе с тем расчет на использование аналогий и заимствование методов отображения не всегда оправдан. Многие виды отображения разработаны для конкретного случая и не переносятся в системы, реализуемые для других задач и других пользователей. Методы представления многомерных дискретных данных, полно описанные, в частности, в [18], оказались неприменимы для отображения многомерных медицинских данных.

Сформулируем приемы построения видов отображения в специализированных системах компьютерной визуализации:

- визуальное утрирование особенностей за счет зависимых от данного случая знаний о физической (биологической информационной и т.п.) и/или математической сущности данных;
- выбор необходимой перспективы наблюдения, в которой необходимо строить графический вывод;
- построение специальных визуальных объектов, не имеющих соответствия среди модельных объектов, но обеспечивающих их анализ и интерпретацию;
- применение множественности видов отображения, показывающих разные аспекты изучаемого явления, создание систем видов отображения, включающих графику,

анимацию, табличные и текстовые представления, а также управление выводом за счет непосредственного манипулирования визуальными объектами;

- использование при построении видов отображения естественной и привычной образности, а также аналогов и “дрейфующих” видов отображения;
- применение в системах визуализации различного назначения новых методик визуализации, в частности методик виртуальной реальности.

Опыт реализации зарубежных систем визуализации, также как и наш собственный опыт разработки (включая “свежий” опыт проектирования методов отображения векторных и скалярных полей на сетках для задачи обтекания), показывает, что методики визуализации играют самостоятельную роль при выделении особенностей модельных объектов и описании характеристик тех или иных процессов. Так при помощи методов воксельной графики возможно эффективное отображение внутренности отдельных элементов трехмерных сеток [2], [8].

4.2 Схема проектирования и реализации систем визуализации

Предлагаемую нами методику проектирования и разработки специализированных систем визуализации можно описать в виде некоторой схемы, предписывающей порядок проектирования и непосредственной реализации систем. Прежде всего, схема состоит из ряда позиций, по которым ведется проектирование системы визуализации. Схема включает в себя также последовательность вопросов, связанных с этими позициями, а также анализа возникающих по ходу процесса проектирования проблем. Основные позиции проектирования в свою очередь определяют набор ролей участников процесса проектирования и разработки. Опишем сначала участников процесса разработки, понимая при этом, что в реальном проекте одни и те же люди могут играть разные роли.

В проектировании и разработке участвуют следующие специалисты:

- заказчик-пользователь,
- проектировщик визуализации,
- специалист в методах компьютерной графике и человеко-компьютерного взаимодействия,
- системный программист.

Основные позиции схемы проектирования специализированных систем визуализации суть следующие:

- решаемая проблема (задача);
- пользователь, для которого предполагается построить средства визуализации;
- программа, решающая данную проблему;
- образность визуализации и методы взаимодействия;
- методики генерации и вывода графики;
- системные вопросы.

Теперь рассмотрим (вероятно неполный) круг вопросов, возникающих в связи с каждой позицией. Отметим, при этом, что все полученные разделы тесно связаны друг с другом, а вопросы из одного раздела по сути вытекают из ответов на вопросы из предыдущих.

Решаемая проблема (задача)

необходимо уяснить ряд пунктов и получить ответ на вопросы:

область исследования, ее физическая и математическая модели, мерность модели и ее объектов, методы и алгоритмы получения численного решения; какова цель моделирования, каков набор основных сущностей моделирования, каковы объекты особого интереса, наличие особых точек, аттракторов, сингулярностей, etc., можно ли (и нужно ли) изучать эти сущности и объекты особого интереса при помощи косвенных методов и использования специально построенных искусственных объектов (артефактов), анализа дополнительных характеристик;

Пользователь проектируемой системы визуализации

необходимо уяснить ряд пунктов и получить ответ на вопросы:

специальность пользователя, используемые методики исследования, каков набор знаний пользователя (общих, специальных и компьютерных), профессиональная культура, опыт работы с вычислительными и, в частности, с визуальными системами (позитивный и негативный), каковы стимулы и мотивации пользователя, каковы особенности национальной культуры, возможно влияющие на его восприятие визуальных образов, каковы психофизиологические свойства пользователя, включая возрастные, половые и эмоциональные особенности, какие знания пользователя о модели и программе могут быть использованы при создании видов отображения и генерации конкретных графических выводов;

Программа

необходимо уяснить ряд пунктов и получить ответ на вопросы:

имеет место параллельное, распределенное или последовательное исполнение, существует ли возможность доступа к данным во время выполнения программы или программа оставляет результаты счета во внешней памяти или файловой системе, когда генерируются необходимы для визуализации данные (в том случае, если есть возможность к данным во время выполнения программы), есть ли возможность по ходу выполнения программы "разметить" исходные данные с тем, чтобы облегчить выделение особенностей;

Образность визуализации и методы взаимодействия

необходимо уяснить ряд пунктов и получить ответ на вопросы:

присущая данной проблематике образность, возможность применения и/или генерации метафоры визуализации, какова цель визуализации, какие объекты мы будем показывать в каждом конкретном случае, как мы сможем отобразить интересующие пользователя объекты, возможность использования стандартных видов отображения и методов взаимодействия с пользователем для отображения важных и интересных особенностей и объектов или необходимость для этого поиска или генерации новых видов отображения, роль динамики для представления изучаемых процессов, возможность использования технологий виртуальной реальности, какие методы человеко-компьютерного взаимодействия следует использовать в выбранных видах отображения;

Методики генерации и вывода графики

необходимо уяснить ряд пунктов и получить ответ на вопросы:

какие методики генерации изображения (рендеринга) адекватны выбранным видам отображения, с учетом потенциальной анимации, виртуальной реальности и пр.

Системные вопросы

Системные вопросы возникают в связи с реализацией интерфейса между компонентами проектируемого программного комплекса. Особенно серьезными эти вопросы становятся в случае параллельной или распределенной его реализации.

5 Система интерактивной визуализации параллельных вычислений

Разработанная методика проектирования специализированных систем визуализации проходит обкатку при создании специализированных систем визуализации для задач, связанных с “большим” счетом (время счета - от нескольких часов до нескольких суток и более). При этом возникает целый ряд проблем, связанных непосредственно с организацией on-line визуализации параллельных вычислений.

Проект системы визуализации параллельных вычислений предполагает ее функционирование по следующей схеме:

- задача считается на параллельном вычислителе и оставляет (окончательный или промежуточный) результат в файлах или в памяти процессоров вычислителя;
- на параллельном же вычислителе проводится некоторая предобработка и фильтрация данных, связанная с будущей визуализацией;
- по заданию пользователя строятся модули описания параллельных фильтров и видов отображения, на вход которых подаются данные после предобработки (на первых этапах предлагается использовать predeterminedенные в системе виды отображения);
- сама визуализация может идти как на графической рабочей станции, так и на параллельной машине (в последнем случае на ПЭВМ может подаваться собственно растр).

Предполагается рассмотреть два варианта использования системы — в off-line (после окончания счета) и on-line (по ходу счета параллельной программы) режимах. Также рассматривается два варианта размещения средств предобработки и визуализации на процессоры параллельного вычислителя — на те же процессоры, где происходил счет или на дополнительно выделенные процессоры вычислителя. Таким образом, в проектируемой системе параллельной визуализации предполагается три независимых класса модулей, отвечающих за параллельную предобработку и фильтрацию, за сбор, хранение и передачу данных и, наконец, за визуализацию. В качестве конкретных примеров, на которых отрабатывается эта схема, рассматриваются задачи математической физики, в частности, связанные с сеточными методами вычислений. Основные данные, получаемые в результате расчетов для аэро- и гидродинамических задач — это массивы значений газодинамических параметров в узлах расчетной трехмерной сетки. Поля газодинамических величин могут быть как скалярными (например, давление, плотность, число Маха, энтропия), так и векторными (поле скоростей). Кроме того, исследователей интересует не только пространственная картина течений, но и распределение величин (плотности, давления) на поверхности объекта, а также плоскостные срезы и одномерные профили полей.

В первом варианте системы рассматривалась регулярная сетка, которая состоит из набора стандартных модулей, например, “прямоугольник”, “квадрат-цилиндр”, “полусфера”, “квадрат” и “законная область”. При этом каждый модуль состоит из нескольких блоков регулярных сеток, ограниченных границами. Программа

предназначена наглядно отображать сеточные данные больших объемов с возможностью поиска аномалий в структуре сетки. Был разработан комплексный вид отображения с элементами интерактивного взаимодействия. При этом в один вид отображения заложена способность к изменению множества параметров, существенно влияющих на адекватность восприятия его содержимого в конкретной ситуации. Предполагается, что может меняться размерность, метод рендеринга, набор доступных функций пользовательского интерфейса, все это будет (возможно, автоматически, в зависимости от некоторого набора внешних факторов). Так, например, при построении сечений сетки плоскостью, удобно спроецировать вид отображения на плоскость перпендикулярную секущей. Использование нескольких методов рендеринга в одном виде отображения заметно повышает его универсальность. Возможности полигональной графики позволяют очень детально описать блочную структуру сетки, иерархию составных частей и особенности ее внутреннего устройства. Воксельная графика подчеркивает прикладное значение сеточных задач, отображая не дискретное множество точек, а трехмерную модель в виде непрерывного массива информации.

Для отображения сеток на базе полигональной графики была разработана среда, которая представляет собой специализированную систему визуализации по выводу сеточных данных с управляемой камерой и системой фильтрации данных. Навигация в системе представляет собой совокупность функций управления камерой. При этом используется проекционная система манипуляции данными. Функции манипуляции данными разделены на группы, такие как “перемещение”, “вращение”, “построение сечений” и т.д.

Система оперирует данными больших объемов. Без эффективных механизмов фильтрации данных возможно снижение производительности. Также неизбежно падение общей эффективности системы за счет перегруженности видов отображения ненужной информацией. Работа системы фильтрации данных состоит из двух частей: “пространственной” и “качественной”. Пространственная фильтрация заключается в выделении необходимого объема сеточных данных на основе их пространственного расположения. Очевидно, что одновременный вывод на экран всего слишком большого объема данных влечет за собой снижение уровня детализации. Кроме того, из-за большой некомпактности визуализируемых данных, более далекие от наблюдателя участки могут оказаться вне поля зрения будучи скрытыми близкими участками. Пространственная фильтрация отчасти решает эту проблему, выделяя область интересующей нас информации из общего ее объема. Функции пространственной фильтрации реализованы с помощью метафоры “альфа-сферы”. Суть метафоры состоит в том, что из общего объема данных выделяется сферическая область. При этом визуальная прозрачность объектов, находящихся внутри области, прямо пропорциональна удаленности объектов от центра области. Таким образом, информация, представляющая для нас наибольший интерес, видна лучше всего, а остальная - тем меньше, чем более удалена от центра области рассмотрения. См. рис. 11. Фильтрация “по значению” необходима для отсека ненужных участков визуализируемых данных на основании значения каких-либо характеристик, заданных на этих участках.

Для целей фильтрация “по значению” введен дополнительный компонент пользовательского интерфейса - поле диапазонов. Внешне поле диапазонов представляет собой узкую полосу, закрашенную градиентом от красного к синему - каждому значению характеристики соответствует цвет на полосе.

“Блочная фильтрация” является наименее универсальным методом фильтрации

данных, но тем не менее эффективно применяется в нашей системе. При визуализации структуры сеток и данных на них возникают задачи как непосредственно отображения сеток и данных в целом, так и задачи построения сечений и изоповерхностей на сетках. Было проведено исследование, которое показало, что возможности воксельной графики позволяют реализовать эти задачи, и что виды отображения на основе ее могут служить мощным дополнением к видам отображений на основе полигональной графики. Возможности воксельной графики позволяют отображать внутреннюю структуру всей сетки и ее блоков (используя метафору прозрачности), а уровень современных видеокарт позволяет добиться интерактивного построения сечений и изоповерхностей как всей сетки, так и отдельных ее участков. При этом существует возможность аппаратной реализации отдельных алгоритмов. См. рис. 12.

Был разработан вид отображения, позволяющий в режиме реального времени просматривать динамику сечений отображаемой сетки — “режим радара”. В нем производится перемещение секущей плоскости от одной стороны воксельного куба к другой, что и позволяет просматривать динамику сечений параллельными плоскостями. Присутствует возможность отображение содержимого воксельного куба от текущего сечения до края куба.

Проведенные исследования показывают, что использование воксельной графики является перспективным направлением в области визуализации сеток и данных на них. Наряду с использованием полигональной графики для отображение сеток планируется активное использование воксельной графики в качестве альтернативного вида отображения, что позволит предоставить пользователю дополнительные инструменты для анализа структуры сетки и данных на ней. Планируется продолжать работы по исследованию методик отрисовки воксельной графики, в частности, большой интерес представляет возможность использования программируемых вершинных и пиксельных конвейеров современных видеокарт, что позволит строить изоповерхности в реальном времени и повысить качество получаемых изображений [3].

Второй вариант системы предполагает вывод нерегулярных сеток различной конфигурации и размера (от нескольких десятков тысяч до нескольких миллионов вершин).

В настоящее время с помощью данной системы были эффективно визуализированы сеточные данные различных типов (в частности блочную сетку с шестигранными примитивами и сплошную тетраэдральную) [8]. См. рис. 13, 14, 15.

Предполагается создание средств вывода в трехмерном пространстве векторных и скалярных полей, изоповерхностей, линий тока и других объектов, могущих быть полезными в исследовании сеточных данных.

Идет работа над распараллеливанием алгоритмов предобработки сеток, а также над подключением к системе средств on-line визуализации параллельных процессов [?], [13]. См. рис. 16.

Список литературы

- [1] Авербух В.Л., Зенков А.И., Исмагилов Т.Р., Манаков Д.В., Пыхтеев О.А., Юртаев Д.А. Разработка специализированных систем научной визуализации // Алгоритмы и програм. средства парал. вычислений: Сб. науч. тр. / ИММ УрО РАН. Вып. 4, Екатеринбург, 2000. С. 3–23.

- [2] Авербух В.Л., Байдалин А.Ю., Горбашевский Д.Ю., Исмагилов Д.Р., Исмагилов Т.Р., Чернин Р.М. Разработка видов отображения в специализированных системах компьютерной визуализации // Труды 12 Международной Конференции по Компьютерной Графике и Машинному Зрению ГрафиКон'2002. Нижний Новгород, 16-21 сентября 2002 г. Нижегородский Гос. Университет. Нижний Новгород, 2002. Стр. 184–189.
- [3] Авербух В.Л., Васев П.А., Горбашевский Д.Ю., Казанцев А.Ю., Манаков Д.В. Система интерактивной визуализации параллельных вычислений // 14-я Международная Конференция по Компьютерной Графике и Зрению ГрафиКон'2004 6–10 Сентября 2004 Москва, Россия. Труды Конференции. МГУ им. М.В. Ломоносова. Стр. 291–294.
- [4] Бабаев Д.Б. Функциональные возможности визуализатора ScientificVR // Супервычисления и математическое моделирование: Тезисы международного семинара. Саров, 2003 ВНИИЭФ-РФЯЦ. Стр. 17–19.
- [5] Баяковский Ю.М., Галактионов В.А., Михайлова Т.Н. ГРАФОР. Графическое расширение ФОРТРАНА. М.: Наука 1985.
- [6] Васев П.А., Перевалов Д.С. Один метод визуализации 4-х мерных множеств // Материалы Всероссийской научной конференции “Суперкомпьютерные вычислительноинформационные технологии в физических и химических исследованиях” Черноголовка 31 октября – 2 ноября 2001 года. Черноголовка. Подмосковный филиал МГУ им. М.В.Ломоносова, Институт Проблем Химической Физики РАН, 2001, с. 32–36.
- [7] Васев П.А., Перевалов Д.С. О создании методов многомерной визуализации // Труды 12-й международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению “ГрафиКон'2002” Нижний Новгород, 16 сентября – 21 сентября 2002 года. Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, 2002, С. 431–437
- [8] Горбашевский Д.Ю., Казанцев А.Ю. Визуализация сеточных данных большого объема // 15-я Международная конференция по компьютерной графике и ее приложениям ГрафиКон'2005 20–14 июня 2005, Россия, Новосибирск, Академгородок Труды Конференции. Новосибирск, Институт Вычислительной математики и математической геофизики. Стр. 366–367.
- [9] Мошков А.В., Пахотинских В.Ю., Решетняк В.О. Специализированная система визуализации некоторых задач оптимального управления // 14-я Международная Конференция по Компьютерной Графике и Зрению ГрафиКон'2004, 6–10 Сентября 2004, Москва, Россия. Труды Конференции. МГУ им. М.В. Ломоносова. Стр. 299–301.
- [10] Averbukh V.L., Ismagilov T.R., Patsko V.S., Pykhtev O.A., Turova V.L. Visualization of value function in time-optimal differential games // ALGORITHMY 2000: 15th Conf. on Sci. Computing, Vysoke Tatry-Podbanske, Slovakia, Sept. 10–15, 2000: Proc. – Bratislava, 2000. P.207–216.
- [11] Bryson S., Levit C. The Virtual Wind Tunnel // IEEE Computer Graphics and Applications, Volume 12 , Issue 4 (July 1992), P. 25–34
- [12] Heermann Ph. D. Production Visualization for the ASCI One TeraFLOPS Machine // Proceedings of the 9th Annual IEEE Conference on Visualization (VIS-98), Oct 18-23 1998, ACM Press, New York, 1998, pp. 459–482.

- [13] Manakov D., Mukhachev A., Shinkevich A. Visualization of the Distributed Data of Huge Volume. Assembly, Filtration, Sorting // Proceedings of the 13-th International Conference on Computer Graphics and Vision Graphicon-2003 Moscow, September 5-10, 2003, pp. 198–201.
- [14] Matsokin A.M., Debelov V.A., Sirotin V.G., Upolnikov S.A. Multi-Purpose Computer Graphics System SMOG-85 // Comput. and Graphics 1988. vol.12, N 3/4. p.441–456.
- [15] Potiy O.A. Anikanov A.A. GPU-Based Texture Flow Visualization // THE 14th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon'2004, September 6-10, 2004 Moscow, Russia. Conference Proceedings. Pp. 155-158.
- [16] OPENDX <http://www.opendx.org/>
- [17] <http://www.cs.sandia.gov/VIS/cubitvr.html>
- [18] Spence R. Information Visualization. L. Addison- Wesley, 2001.
- [19] Visualization in Scientific Computing, Special Issue, ACM SIGGRAPH Computer Graphics, V. 21, N 6, November 1987.
- [20] Wijk J.J. van Image Based Flow Visualization // Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002. ACM Transactions on Graphics vol 21, no 3, p. 745-754.

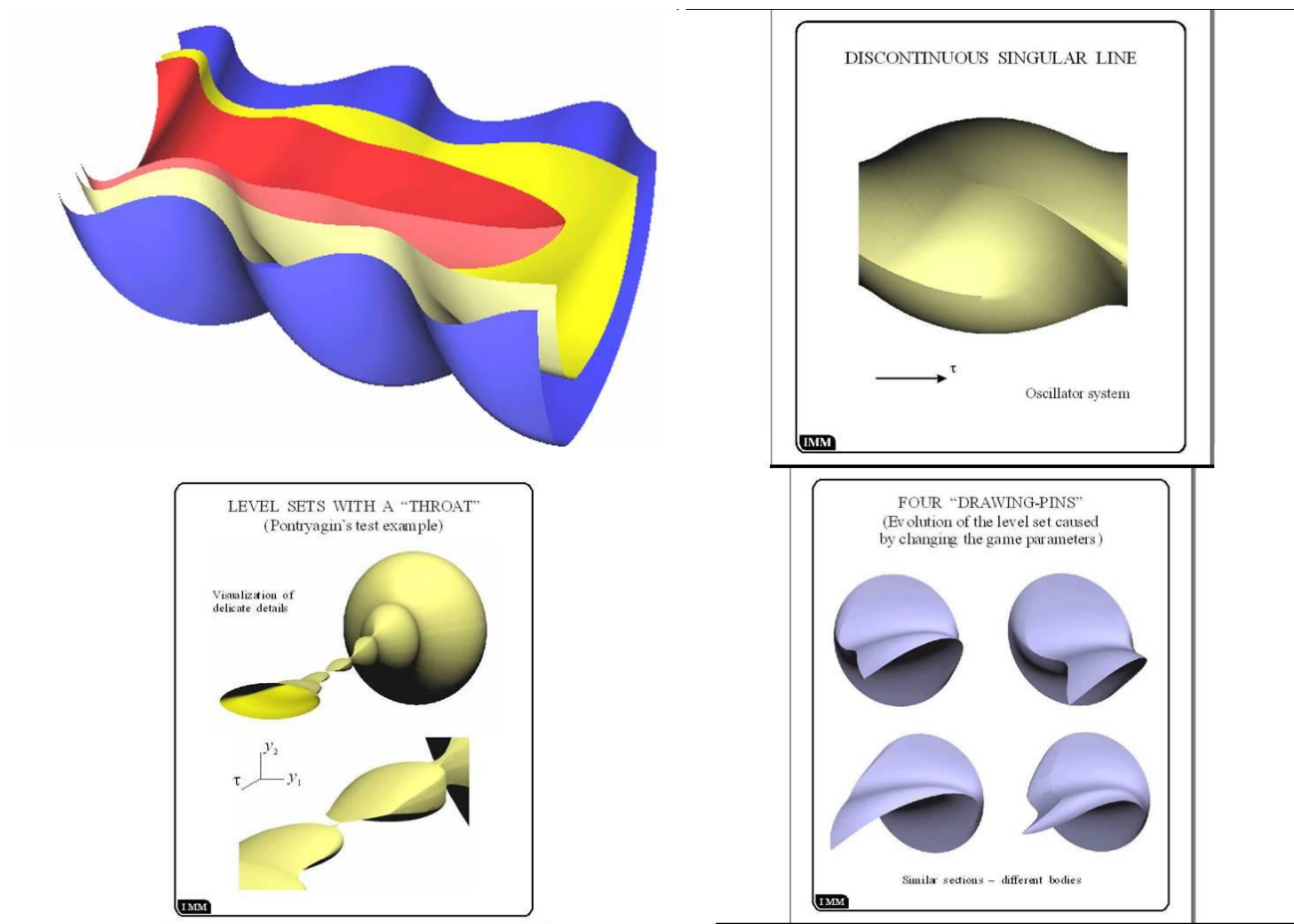


Рис. 1: Система визуализации построения максимальных стабильных мостов в линейных дифференциальных играх.

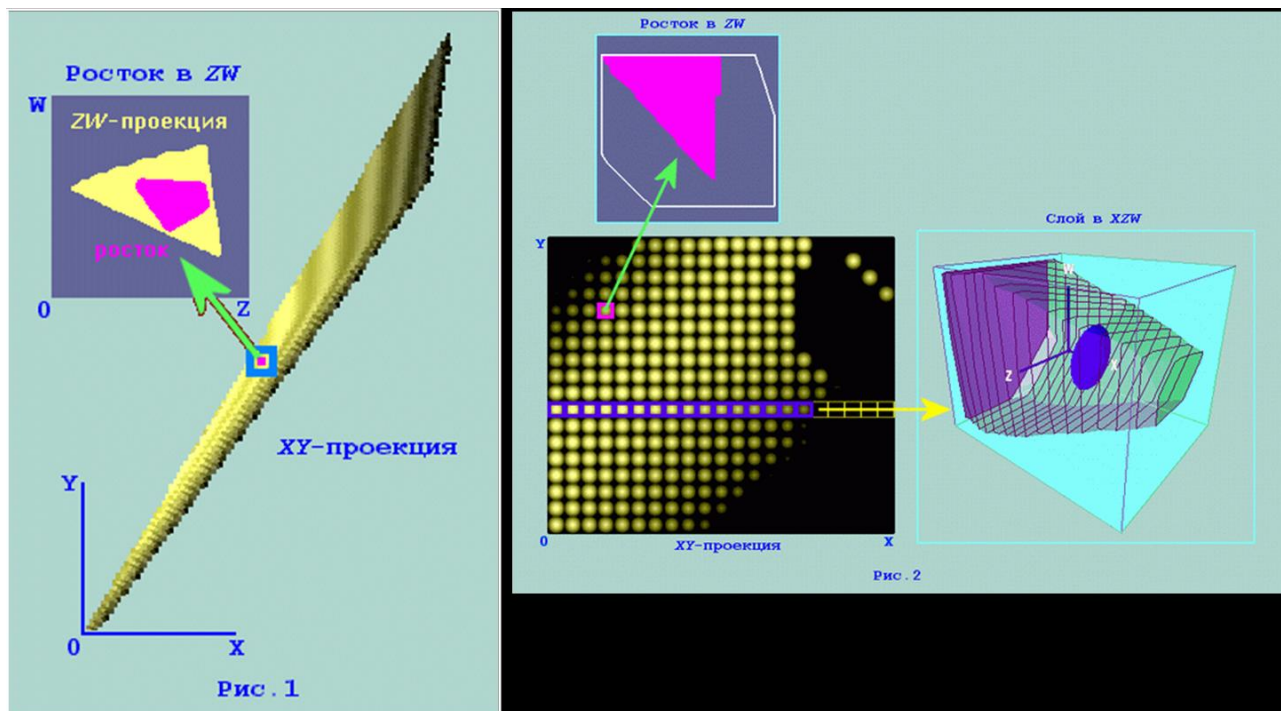


Рис. 2: Визуализация четырехмерных информационных множеств.

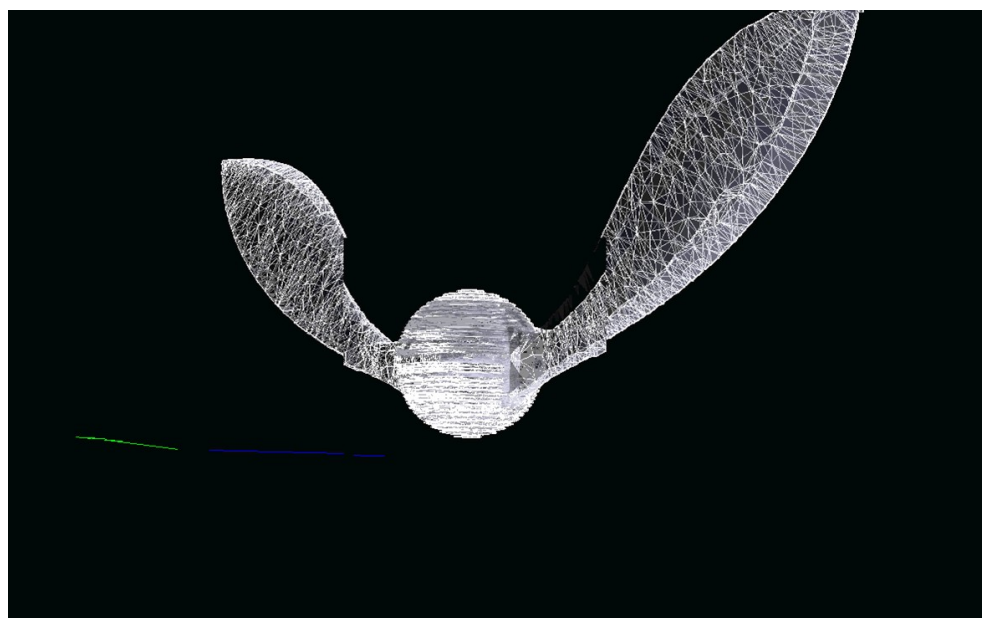


Рис. 3: Визуализация области достижимости в одной из задач оптимального управления.



Рис. 4: Система интерактивной визуализации параллельных вычислений, разработанная в Sandia Labs.

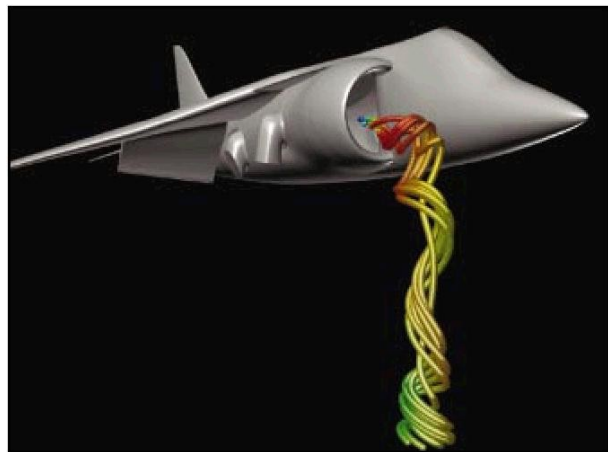


Рис. 5: Виртуальная аэродинамическая труба. NASA.

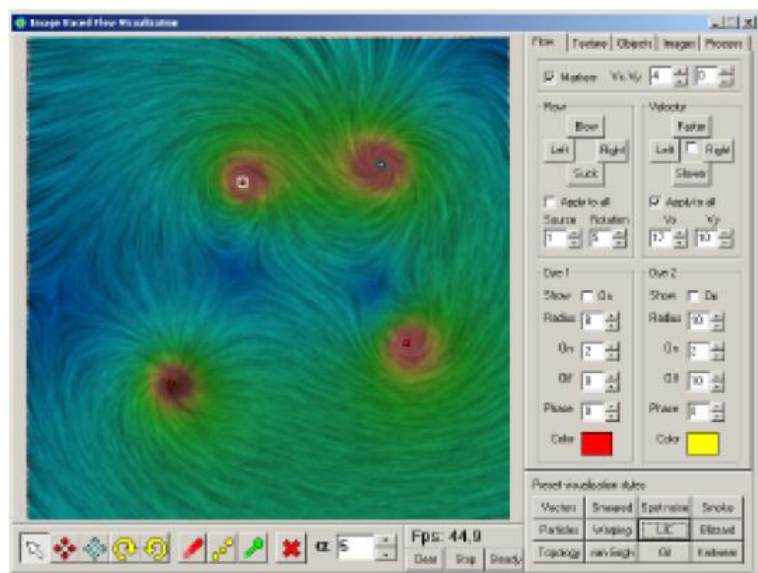


Рис. 6: Интерактивная система моделирования и визуализации потоков. Технический Университет, Эйндховен(Голландия)

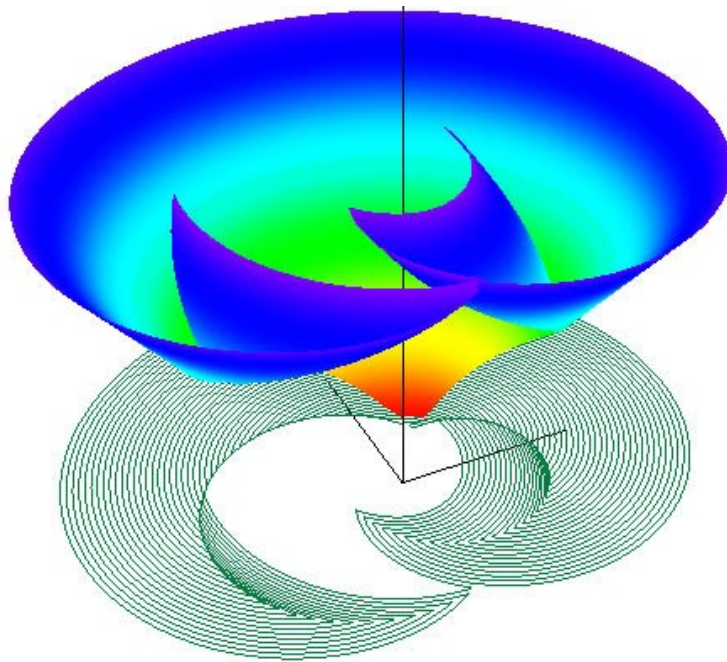


Рис. 7: Трехмерный график функции цены дифференциальной игры.

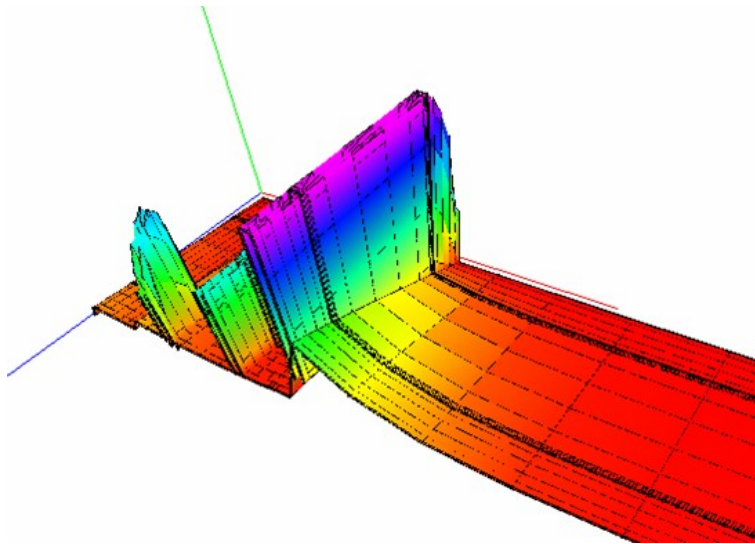


Рис. 8: Пример совмещения на одном графике небольших (фоновых) значений и очень больших всплесков.

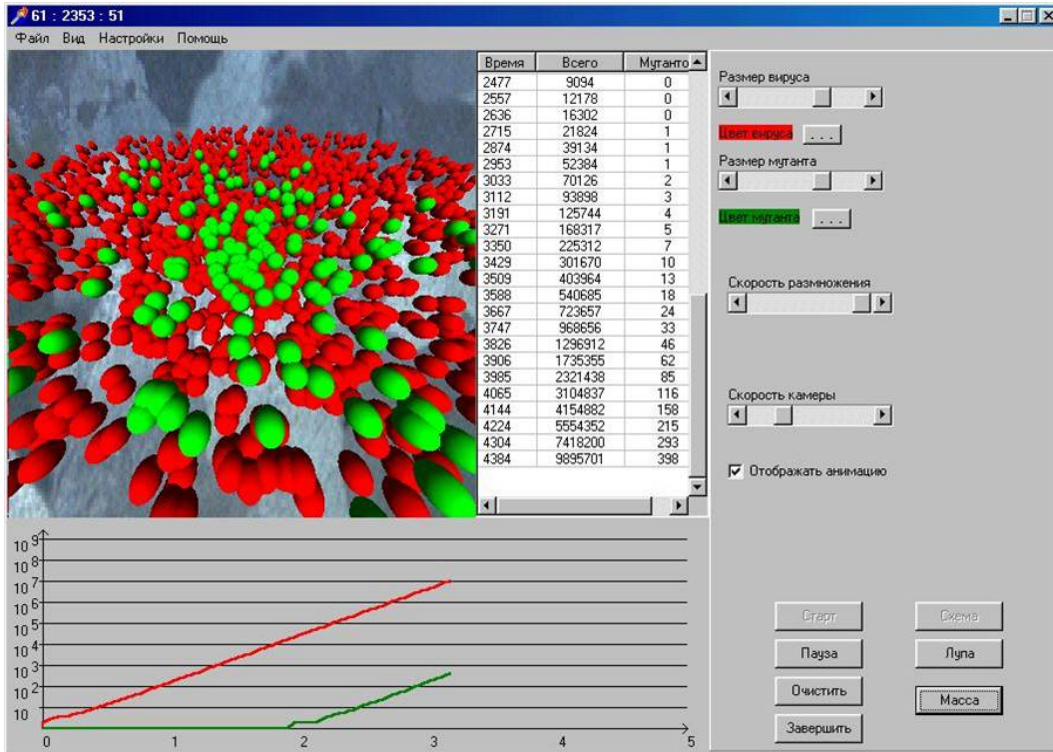


Рис. 9: Система визуализации кинетики размножения и мутации вирусов.

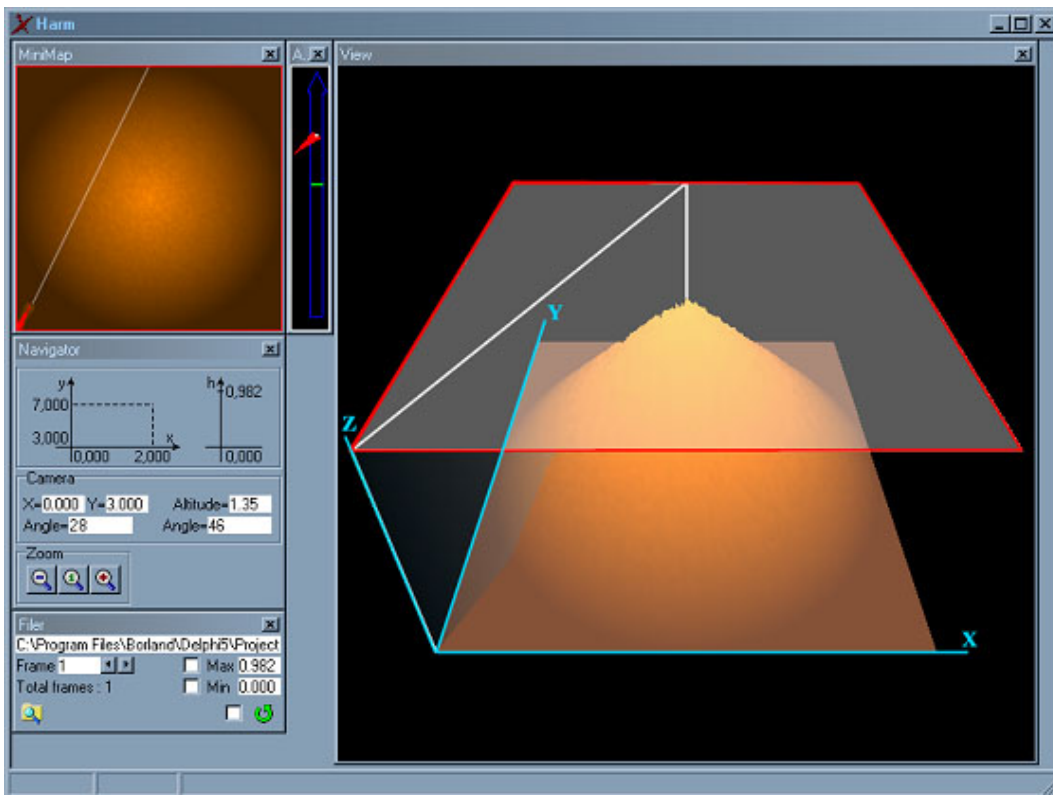


Рис. 10: Система визуализации моделирования загрязнения окружающей среды.

Система интерактивной визуализации параллельных вычислений

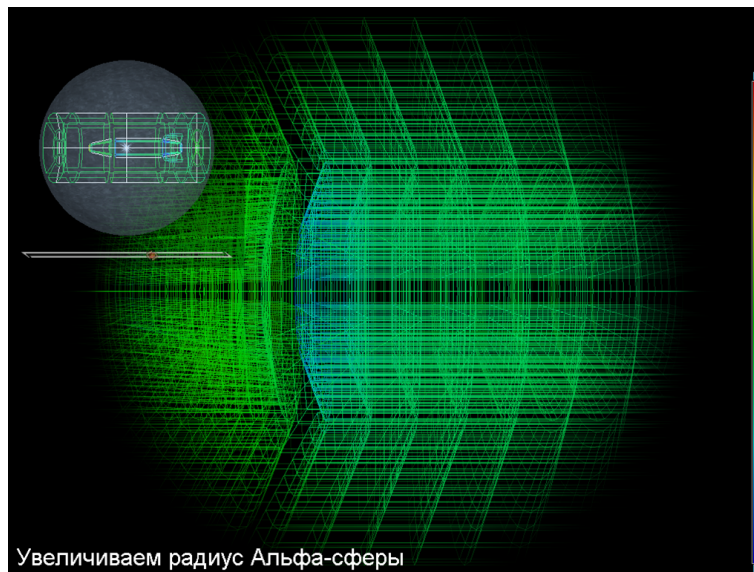


Рис. 11: Использование метафоры “альфа-сферы”.

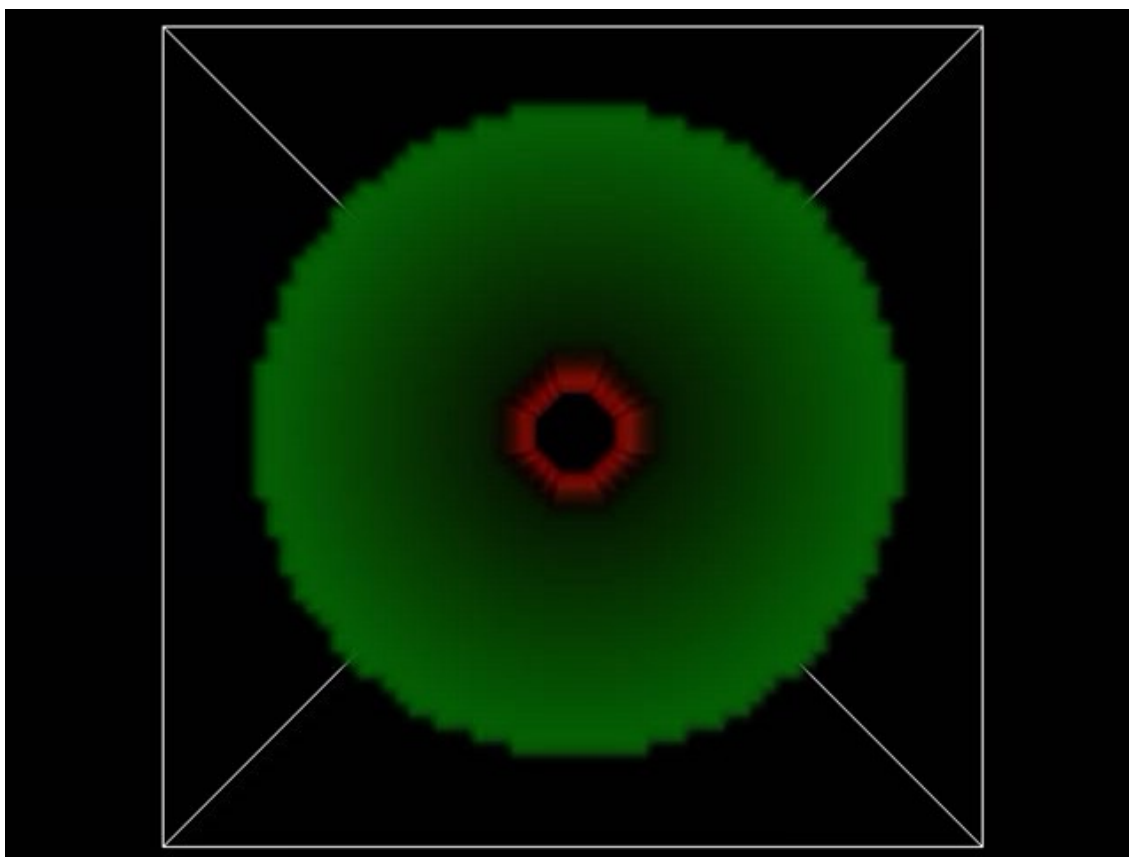


Рис. 12: Использование воксельной графики.

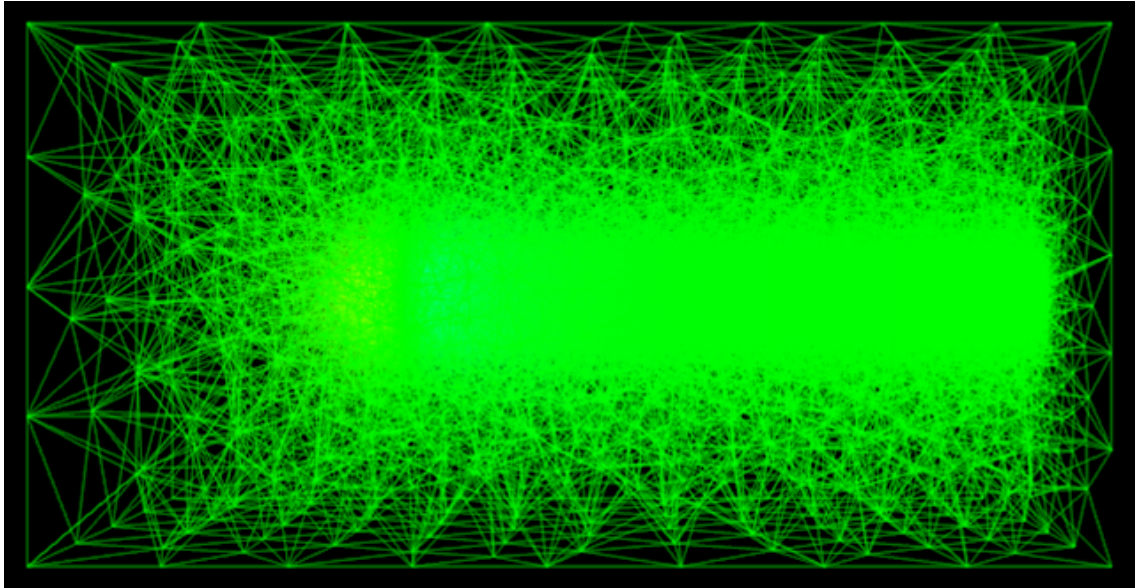


Рис. 13: Отображение тетраэдральных сеток. Объем сетки 70300 точек. Сетка целиком.

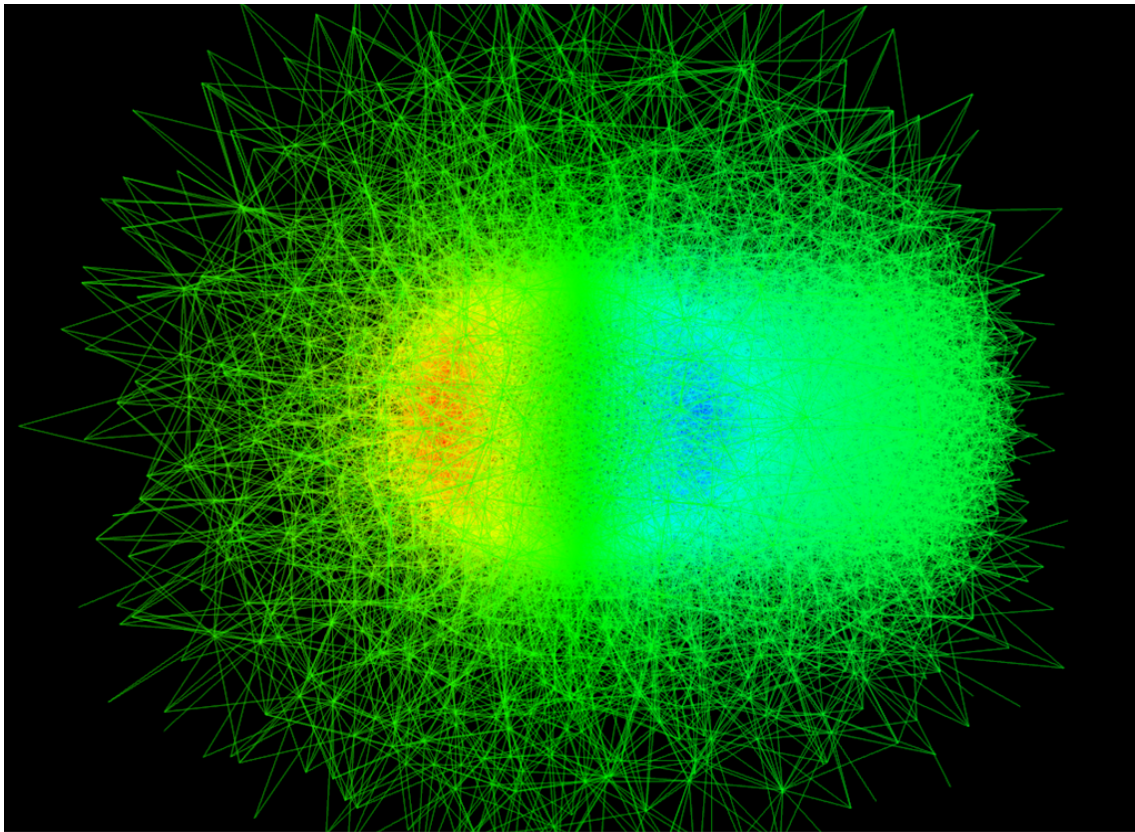


Рис. 14: Отображение тетраэдральных сеток. Участок тетраэдральной сетки объемом 70300 точек. Отображаются только точки попавшие в сферу заданного радиуса. Поток движется на сферу, цветом показано давление.

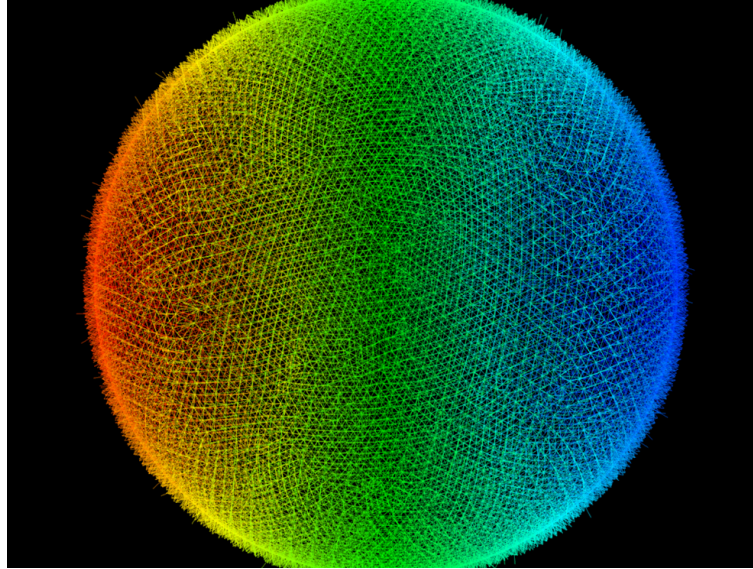


Рис. 15: Отображение тетраэдральных сеток. Участок тетраэдральной сетки рядом со сферическим телом. Общий объем сетки 546266 точек. Поток движется на сферу, цветом показано давление.

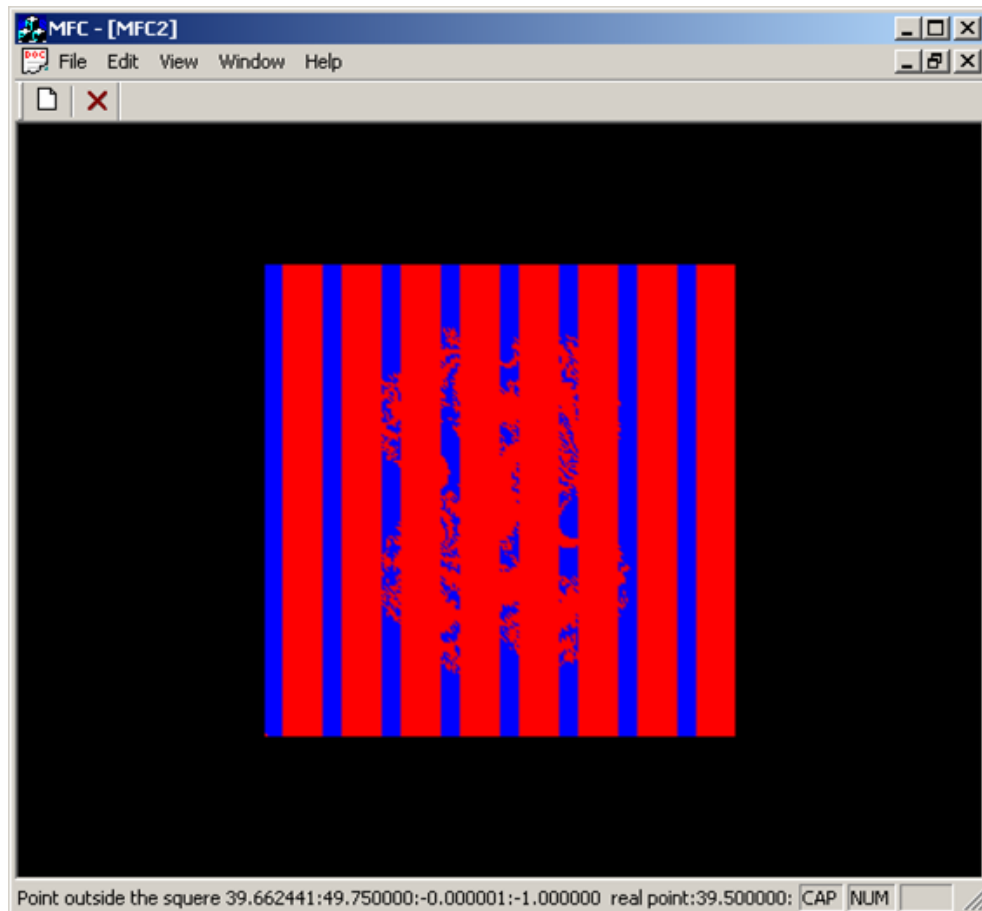


Рис. 16: On-line визуализация. Обсчет множества Жюлиа на сетке 2000×2000 .