

РАЗДЕЛ 2

МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, МЕХАНИЗМЫ В ТЕХНИКЕ

УДК 004.942

ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ В ИНТЕРФЕЙСАХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Ю. Н. Косников, Е. А. Кольчугина

TECHNOLOGIES OF VIRTUAL ENVIRONMENT IN THE INTERFACE OF ECONOMIC INFORMATION SYSTEMS

Yu. N. Kosnikov, E. A. Kol'chugina

Аннотация. *Предмет.* Человеко-машинный интерфейс виртуальной среды все шире используется в экономических информационных системах. Объекты пространственного интерфейса имеют произвольную, в том числе криволинейную, форму. Неаналитическая форма объектов задается скалярным полем. Предложена информационная технология построения интерфейса, содержащего такие объекты. Даны рекомендации по отображению объектов интерфейса в реальном времени. *Методы.* Предлагается решить поставленную задачу с помощью двухэтапной интерполяции, основанной на последовательном применении радиальных базисных функций и сплайнов. *Результаты.* Предлагаемая двухступенчатая технология основана на сочетании методов интерполяции. На первом этапе осуществляется переход от исходного набора опорных точек к новому набору точек, регулярно расположенных в выбранной системе координат. На втором этапе используются сплайны Безье. Они позволяют настраивать характер поверхности объекта и отображать его в режиме реального времени. Настройка формы поверхности объекта выполняется итерационным способом. Он основан на минимизации отклонения поверхности Безье от поверхности, полученной с использованием радиальных базисных функций. *Выводы.* Предлагаемая двухступенчатая технология для представления объектов интерфейса как элементов виртуальной среды показывает хорошие изобразительные возможности и обеспечивает функционирование интерфейса в режиме реального времени.

Ключевые слова: человеко-машинный интерфейс, виртуальное окружение, скалярное поле, интерполяция, радиальная базисная функция, сплайн Безье.

Abstract. *Background.* The human-machine interface of the virtual environment is becoming more widely used in economic information systems. The objects of spatial interface have an arbitrary, including curvilinear, shape. The non-analytical form of objects is given by a scalar field. The information technology of building an interface containing such objects is proposed. Recommendations for displaying interface objects in real time are given. *Methods.* It is proposed to solve the problem by means of two-stage interpolation based on the sequential application of radial basis functions and splines. *Results.* The proposed two-stage technology is based on a combination of interpolation methods. At the first stage, a transition is made from the initial set of reference points to a new set of points regularly arranged in the chosen coordinate system. The second stage uses Bezier splines. They allow you to customize the surface's nature of the object and display it in real time. Setting the

shape of the object's surface is done in an iterative way. It is based on minimizing the deviation of the Bezier surface from the surface obtained by using radial basis functions. *Conclusions.* The proposed two-stage technology for representing interface objects as elements of a virtual environment shows good visual capabilities and ensures the operation of the interface in real time.

Key words: man-machine interface, virtual environment, scalar field, interpolation, radial basis function, spline Bezier.

Введение

Человеко-машинный интерфейс – один из факторов эффективной работы любой эргатической системы. В настоящее время распространены графические интерфейсы. Предметная область накладывает отпечаток на их вид и заставляет выбирать для их создания различные подходящие средства. Этими средствами создается в виде компьютерной модели интерфейсное пространство, имеющее заданную мерность (1d, 2d, 2.5d, 3d, 4d) и содержащее интерфейсные объекты. Объектами 1d-пространства являются, например, прямолинейные шкалы, объектами 2d-пространства – плоские графики. Представление 2.5d добавляет к 2d-объекту информацию о третьей координате в виде дополнительных элементов, например, надписей, меток, теней. Так, рельеф местности отображается в виде плоского рисунка геодезических линий с метками высот, цилиндрический резервуар – в виде плоского рисунка с тенями объемности. Пространственные объекты размещаются в 3d-пространстве: трехмерные диаграммы, объемные мнемосимволы, рельеф местности. Изменение состояния 3d-объектов во времени дает 4d-представление.

Интерфейсы большинства экономических информационных систем (ЭИС) отображают состояние сравнительно медленно изменяющихся параметров. В качестве примеров можно назвать интерфейсы систем моделирования бизнес-процессов, систем управления предприятием, систем обработки экономических данных (например, процессоров электронных таблиц). Для их создания применяются универсальные или предметно-ориентированные средства компьютерной графики. Это графические инструменты сред программирования, графические редакторы, редакторы SCADA-систем.

Однако для целого ряда приложений принципиальным является функционирование интерфейса в режиме реального времени (РВ). Это контроль быстро меняющихся данных: параметров технологических процессов, транспортных средств, пациентов лечебных учреждений. Особенно важным является оперативная оценка ситуации с помощью интерфейса в областях повышенной опасности. В этих предметных областях зачастую традиционные интерфейсы имеют пониженную эффективность. Например, на рис. 1 показаны интерфейсы энергетической системы контроля атомной электростанции и медицинской системы контроля состояния пациента [1, 2]. Визуальный анализ интерфейсов показывает, что для общей оценки состояния объектов контроля с их помощью требуется довольно много времени.

Состояние динамического объекта в целом можно оценить, используя средства интегрального представления данных [3]. Однако оно имеет и недостаток: с его помощью затруднительно принять решение по управлению конкретными параметрами объекта.

Человек живет в реальном трехмерном мире, в нем вырабатывает навыки оценки ситуации и принятия решений. Однако выполнять интерфейс

в виде полномасштабной системы виртуальной реальности накладно с точки зрения затрат вычислительных ресурсов. В связи с этим универсальным подходом к представлению данных в режиме РВ является создание интерфейса с элементами виртуальной реальности, дополненными вспомогательными тексто-графическими элементами, то есть интерфейса виртуального окружения (ИВО) [4]. Пример ИВО показан на рис. 2 [5].

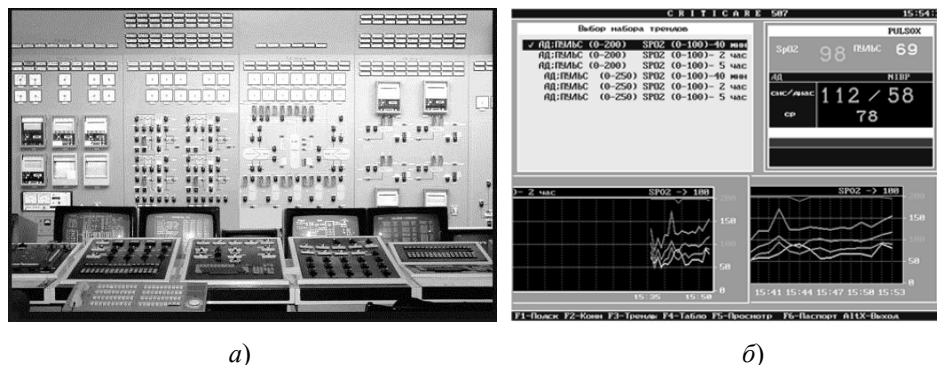


Рис. 1. Интерфейсы энергетической (а) и медицинской (б) систем контроля



Рис. 2. Интерфейс виртуального окружения для проектирования автомобилей

Методы создания объектов интерфейса и их особенности

Для построения ИВО нужно уметь, во-первых, создавать геометрические формы любой конфигурации и, во-вторых, повышать их реалистичность известными приемами компьютерной графики – наложением теней и текстур. Для решения второй задачи геометрические формы нужно представлять в форме полигональной модели, обработка которой поддерживается графической системой компьютера.

Создание геометрических форм имеет большое своеобразие. Геометрические формы, как правило, описываются не аналитически, а набором характерных точек (скалярным полем). Эти характерные точки рассчитываются по результатам моделирования, задаются специалистом, берутся с чертежа, получаются 3d-сканером, являются результатом эксперимента. Возникает вопрос: как реконструировать поверхность объекта интерфейса по скалярному полю? Модель поверхности может быть построена по характерным точкам

средствами программы-моделера, например 3dsMAX или Blender. При необходимости программной обработки модели она конвертируется в требуемый формат программой-конвертером, например Deep Exploration. Однако таким путем сразу создается полигональная модель, которая в случае протяженных объектов имеет большой объем и требует для обработки в режиме РВ значительных вычислительных ресурсов. Кроме того, при неравномерной расстановке характерных точек полигональная модель дает явно видимые грани. Существует другой подход: строить модель объекта таким образом, чтобы промежуточные преобразования модели выполнялись над ограниченным числом ее характерных точек, а необходимая для работы графической системы компьютера полигональная сеть создавалась быстрыми алгоритмами в режиме РВ. При этом должны быть выполнены условия реконструкции объекта интерфейса, учитывающие конечную цель этого процесса – реалистичное и пригодное для выполнения прикладных задач отображение объекта на информационном поле наблюдателя. Основные условия реконструкции следующие [6]:

- точное прохождение поверхности через характерные точки;
- сохранение топологической тенденции в промежутках между характерными точками;
- гладкость поверхности и отсутствие у нее осцилляций (выбросов);
- наличие корректных нормалей к поверхности, проведенных через ее характерные точки (нормали нужны для моделирования освещенности объекта);
- возможность применить быстрые алгоритмы для вычисления промежуточных точек поверхности и векторов нормалей в этих точках;
- возможность алгоритмически просто получить полигональную модель объекта.

Существует целый ряд аппроксимативных, алгоритмических и интерполяционных методов реконструкции поверхности по скалярному полю. Аппроксимативные методы характеризуются нежелательной методической погрешностью реконструкции, а зачастую вообще не дают корректного результата, например [7]. Алгоритмические методы действуют по принципу пошаговой «подгонки» формируемой поверхности к поверхности-оригиналу. В этом случае поверхность, полученная в результате реконструкции, проходит через исходные характерные точки, но не сохраняет топологическую тенденцию между ними, например [8]. Методы, основанные на полиномиальной интерполяции, имеют довольно громоздкое математическое описание, включающее дробные выражения, что затрудняет их реализацию в режиме РВ. Кроме того, они характеризуются осцилляциями, особенно при значительном количестве узлов интерполяции (характерных точек) [9]. Самым простым методом реконструкции является линейная интерполяция, которая дает полигональную модель поверхности. Ее недостаток (негладкая поверхность) назван ранее.

Хорошими формообразующими свойствами обладают методы интерполяции на основе смешивающих функций. Они дают гладкую поверхность, точно проходящую через характерные точки. Однако и эти методы не свободны от недостатков [10]. Так, метод обратного взвешенных расстояний и сходный с ним метод Шепарда дают интерполяцию пониженного качества, если распределение опорных точек носит неравномерный характер. При этом

высота промежуточных точек не может превосходить высоту исходных характерных точек, что повышает погрешность методов. К тому же из-за большого количества операций умножения, деления и возведения в степень на больших объемах данных отмечается низкая скорость работы методов.

В компьютерной графике популярна сплайн-интерполяция поверхностей [11]. Для представления протяженной поверхности отсеками сплайна Безье требуется выделить подмножества характерных точек, на которых будут формироваться отсеки составной поверхности. Отсек поверхности Безье описывается 16 опорными точками, 4 из которых находятся в углах отсека, а 12 задают его изгибы, но не лежат на его поверхности. Если за опорные точки отсека принять 16 характерных точек исходного множества, то поверхность отсека не пройдет через все характерные точки. Если исходное множество разбить на четверки характерных точек и принять их за угловые опорные точки отсеков, то для задания изгибов для каждого отсека нужно дополнительно определить 12 опорных точек, что алгоритмически затруднительно сделать на неупорядоченном наборе исходных точек. Другой вариант – В-сплайновая интерполяция – дает поверхность, в общем случае не проходящую ни через одну опорную точку. Для выполнения задачи точной интерполяции в качестве опорных точек сплайновых отсеков нужно использовать не исходные характерные точки поверхности, а новые – вычисленные специальным образом. Такой прием значительно усложняет алгоритм реконструкции, особенно для протяженных поверхностей. Модификация В-сплайнов – NURBS – имеет описание в виде дроби и сложна для реализации в режиме РВ. Гладкую интерполяцию на множестве неупорядоченных точек дает сплайн Акимы [12]. Отсек сплайна Акимы имеет треугольную форму. Для «настройки» формы нужно найти 21 коэффициент полинома пятой степени. Эти коэффициенты определяются с помощью условий точного прохождения интерполанта через исходные точки, условий гладкой стыковки с соседними отсеками сплайна и гладкости интерполанта (значений частных производных первого и второго порядка в каждой вершине отсека). При восстановлении еще несуществующей поверхности определить значения частных производных весьма затруднительно, а интерполяция поверхностей, содержащих большое количество отсеков, в режиме РВ на основе полиномов пятой степени требует повышенных вычислительных ресурсов.

Хорошими интерполяционными возможностями обладают радиальные базисные функции (РБФ) [13–16], но их применение в задачах визуализации также не свободно от недостатков. Эффективная интерполяция на основе популярных РБФ инверсного мультиквадрика (inverse multiquadric), гауссиана (gaussian), плоского сплайна (thin-plate spline), инверсного квадрата (inverse quadratic) не позволяет использовать быстрые алгоритмы вычислений, а применение простых, например линейных, РБФ дает значительную погрешность интерполяции.

Создание объектов интерфейса на основе двухэтапной интерполяции

В качестве выхода можно предложить двухэтапную интерполяцию поверхностей на основе последовательного применения РБФ и сплайнов. На первом – предварительном – этапе осуществляется переход от исходного набора опорных точек к новому набору, характеризующемуся регулярной расстановкой в выбранной системе координат. Этот этап выполняется не в

режиме РВ и может использовать РБФ, хорошо зарекомендовавшие себя в интерполяции поверхностей требуемого вида. Сначала по известному алгоритму с применением РБФ образуется аналитическое описание реконструируемой поверхности (в целом или по сегментам). Для устранения возможных аномалий реконструкции первый этап целесообразно проводить во вспомогательной системе координат, где поверхность описывается однозначной функцией. Методика перехода во вспомогательную систему координат описана в [17]. После получения аналитического описания поверхности на ней задаются новые опорные точки. Для этого во вспомогательной системе координат организуется последовательный перебор переменных-аргументов с некоторым шагом, величина которого зависит от требуемой точности интерполяции. Одновременно идет вычисление интерполянта по аналитическому выражению. В результате получаются тройки координат новых опорных точек во вспомогательной системе координат. При необходимости они пересчитываются в систему координат, в которой были заданы исходные опорные точки.

На втором этапе интерполяции рационально использовать сплайны Безье, так как отсеки поверхности Безье проходят через опорные точки, обеспечивается гладкость составной поверхности, а ее характер (сглаженный или бугристый) может быть настроен. В связи с этим на первом этапе осуществляется переход от описания поверхности через РБФ к описанию опорными точками сплайновых отсеков Безье. Для этого в полученном множестве новых опорных точек выделяются четверки точек, отстоящих друг от друга не более, чем на один шаг переменных-аргументов («топологический квадрат»). Выполнить эту операцию при регулярной расстановке опорных точек несложно. Выбранные четверки точек принимаются за углы отсеков. Поскольку отсек поверхности Безье описывается 16 опорными точками, 12 опорных точек, задающих изгибы отсека, нужно доопределить. Эти точки лежат на касательных, проведенных через угловые точки отсеков. Доопределение опорных точек проводится в соответствии с методом, описанным в [18]. За направление касательной, проведенной через i -ю опорную точку в каждом направлении аргументов (в том числе в диагональном), принимается направление хорды, соединяющей в соответствующем направлении исходные опорные точки с номерами $(i - 1)$ и $(i + 1)$. Иллюстрация метода для плоской кривой Безье показана на рис. 3, где P_0, P_1, P_2, P_3 – опорные точки, а отрезки P_1Q_1, P_2Q_2 принадлежат касательным, проведенным для случаев $i = 1$ и $i = 2$.

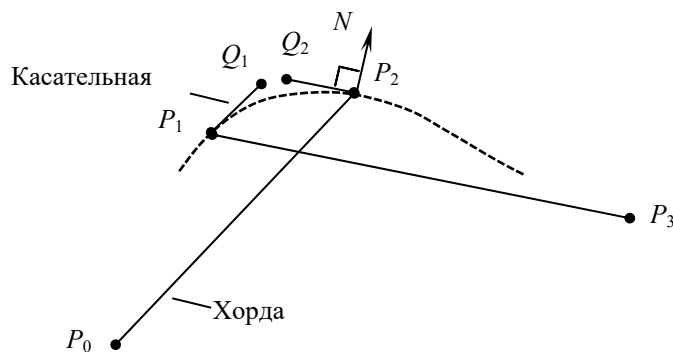


Рис. 3. Определение направлений касательных в опорных точках отсека Безье

На каждой касательной в пределах отсека располагается одна дополнительная опорная точка, на рис. 3 это точки Q_1, Q_2 . Положения дополнительных точек на касательных определяют степень выпуклости или вогнутости фрагмента отсека, прилежащего к угловой опорной точке, через которую проходят касательные. Координаты дополнительных точек на касательных должны быть как-то определены.

Управление формой объекта интерфейса путем настройки отсеков Безье

Определить положение дополнительной точки на касательной к отсеку Безье можно из следующих соображений, которые приводятся для случая плоского отсека (см. рис. 3) и далее распространяются на пространственный отсек.

Для касательной P_1Q_1 направление задается тангенсом угла наклона, который совпадает с тангенсом угла наклона хорды P_0P_2 :

$$\frac{y_{Q_1} - y_{P_1}}{x_{Q_1} - x_{P_1}} = \frac{y_{P_2} - y_{P_0}}{x_{P_2} - x_{P_0}}.$$

Добавление некоторого коэффициента k не изменяет результата:

$$\frac{(y_{Q_1} - y_{P_1})k}{(x_{Q_1} - x_{P_1})k} = \frac{y_{P_2} - y_{P_0}}{x_{P_2} - x_{P_0}}.$$

Приравняв числители и знаменатели последнего соотношения, получим выражения для нахождения координат дополнительной точки касательной:

$$x_{Q_1} = x_{P_1} + \frac{x_{P_2} - x_{P_0}}{k}, \quad y_{Q_1} = y_{P_1} + \frac{y_{P_2} - y_{P_0}}{k}.$$

Значение k определяет длину отрезка P_1Q_1 и для сплайновой кривой Безье влияет на ее выпуклость вдоль касательной P_1Q_1 : чем меньше k , тем больше выпуклость.

Пространственный отсек Безье строится на 16 опорных точках, проекции которых на поверхность аргументов образуют топологически ортогональную сетку, показанную на рис. 4.

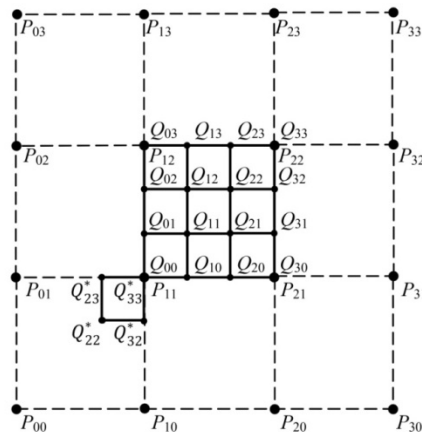


Рис. 4. Ортогональная сетка проекций опорных точек отсека Безье на поверхность аргументов

На рис. 4 символами P обозначены опорные точки исходного множества (узлы интерполяции), с ними совпадают угловые точки отсеков Безье, в частности, $Q_{00}=P_{11}$, $Q_{30}=P_{21}$, $Q_{03}=P_{12}$, $Q_{33}=P_{22}$. Остальные опорные точки отсека Безье, обозначенные символами Q , лежат на касательных к поверхности отсека, проведенных через его угловые точки в горизонтальном, вертикальном и диагональном направлениях. Эти 12 опорных точек определяют изгибы отсека Безье и должны быть доопределены. В соответствии с методом, описанным выше, координаты этих точек определяются соотношениями (на примере точек Q_{10} , Q_{01} , Q_{11}):

$$\begin{aligned}
x_{Q10} &= x_{P11} + \frac{x_{P21} - x_{P01}}{k_{10}}, \\
y_{Q10} &= y_{P11} + \frac{y_{P21} - y_{P01}}{k_{10}}, \\
z_{Q10} &= z_{P11} + \frac{z_{P21} - z_{P01}}{k_{10}}, \\
x_{Q01} &= x_{P11} + \frac{x_{P12} - x_{P10}}{k_{01}}, \\
y_{Q01} &= y_{P11} + \frac{y_{P12} - y_{P10}}{k_{01}}, \\
z_{Q01} &= z_{P11} + \frac{z_{P12} - z_{P10}}{k_{01}}, \\
x_{Q11} &= x_{P11} + \frac{x_{P22} - x_{P00}}{k_{11}}, \\
y_{Q11} &= y_{P11} + \frac{y_{P22} - y_{P00}}{k_{11}}, \\
z_{Q11} &= z_{P11} + \frac{z_{P22} - z_{P00}}{k_{11}},
\end{aligned} \tag{1}$$

где k_{10} , k_{01} , k_{11} – коэффициенты, задающие изгиб отсека вблизи т. P_{11} в различных направлениях.

Аналогичным образом находятся координаты остальных опорных точек отсека.

Следует сделать одно замечание, касающееся последних соотношений. На рис. 4 сетка проекций опорных точек отсека на поверхность аргументов показана геометрически прямоугольной. Тем самым подчеркивается свойство ее ортогональности: каждый узел отстоит от соседнего на один шаг сетки. В этом случае узлы сетки, лежащие на ее линиях, имеют одинаковые координаты либо в одном, либо в другом направлении. В то же время геометрические координаты x , y , z узлов одной линии в общем случае не совпадают, в связи с чем в последних соотношениях в общем случае нет нулевых слагаемых.

Отсеки Безье должны гладко стыковаться, образуя составную поверхность. Для этого должны быть выполнены два условия: граничные опорные

точки смежных отсеков должны совпадать и касательные, проведенные через общие точки смежных отсеков, должны быть коллинеарны. Нетрудно видеть, что описанная последовательность определения опорных точек отсеков Безье приводит к автоматическому выполнению указанных условий.

В процессе расчета координат опорных точек нужно решить вопрос: какими выбрать коэффициенты, задающие степень выпуклости или вогнутости каждого отсека? Значение коэффициента для каждой касательной можно найти итерационным способом. В его основу положена минимизация отклонения поверхности, состоящей из сегментов Безье, от эталонной поверхности, за которую, за неимением лучшего, принимается поверхность, полученная с помощью РБФ. Последовательно меняя значение k для каждой опорной точки, то есть меняя ее расположение на касательной, можно в пошаговом режиме определять различие поверхностей Безье-интерполяции и РБФ-интерполяции, минимизируя расхождение между ними. На первый взгляд, это весьма ресурсоемкая операция, однако следует заметить, что изменение одной опорной точки составной поверхности Безье влияет не на все ее отсеки, а только на три смежных отсека [19]. Следовательно, в процессе настройки рельефа нет необходимости вычислять положения всех текущих точек составной поверхности. То же можно сказать и о поверхности, полученной РБФ-интерполяцией. Алгоритмизация процесса настройки рельефа может быть различной, но логика ее понятна. Процесс подгонки составной поверхности Безье к эталонной поверхности может выполняться за несколько итераций, число которых определяется желаемой погрешностью приближения.

По окончании первого этапа реконструкции информационная модель поверхности интерфейсного объекта получает вид множества координат опорных точек составной сплайновой поверхности. К ним нужно добавить координаты нормалей, проведенных через угловые точки отсеков. Направления нормалей используются в процессе моделирования освещенности криволинейной поверхности (затенения). Без затенения трехмерный объект на изображении выглядит плоским, а не пространственным, то есть теряет реалистичность. Строго говоря, нужно найти направления нормалей во всех узлах (вершинах) полигональной сетки. Традиционно это делают путем усреднения нормалей к полигонам, сходящимся в угловых точках смежных отсеков [20]. Это довольно ресурсоемкая операция, так как в угловой точке могут располагаться до восьми вершин смежных полигонов. Можно предложить упрощенный алгоритм и определить вектор нормали как перпендикуляр к касательной плоскости в угловой точке сегмента Безье (для плоской кривой – вектор N на рис. 3). Математически такая нормаль описывается векторным произведением касательных векторов. Приняв за такие векторы касательные, проведенные через угловую точку в направлениях координатных осей x и y , можно записать уравнение нормали в виде определителя. Например, для точки P_{11} используются касательные $P_{11}Q_{10}$, $P_{11}Q_{01}$, и уравнение нормали с учетом выражений (1) получает вид

$$N = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{(x_{P21} - x_{P01})}{k_{10}} & \frac{(y_{P21} - y_{P01})}{k_{10}} & \frac{(z_{P21} - z_{P01})}{k_{10}} \\ \frac{(x_{P12} - x_{P10})}{k_{01}} & \frac{(y_{P12} - y_{P10})}{k_{01}} & \frac{(z_{P12} - z_{P10})}{k_{01}} \end{vmatrix}.$$

Аналогично находятся нормали в остальных угловых точках отсека. Для нахождения уровня освещенности в промежуточных точках отсека нормали в этих точках (в узлах полигональной сетки) находятся путем линейной интерполяции по методу Фонга [20].

Второй этап реконструкции поверхности объекта интерфейса выполняется в режиме РВ. Новые опорные точки и проведенные через них нормали образуют информационную модель объекта. Над ней в процессе эволюции выполняются геометрические преобразования динамики. Далее по преобразованному набору опорных точек и нормалей реконструируется поверхность. Для ее визуализации стандартными графическими средствами поверхность должна быть представлена в форме полигональной сетки. С этой целью выполняется тесселяция сплайновых отсеков. Чтобы обеспечить режим РВ, тесселяцию следует проводить одним из быстрых алгоритмов, например, на основе метода конечных разностей [21].

Выводы

В итоге, технология моделирования неаналитических поверхностей, построенная на описанных решениях, получает вид, укрупненно показанный на рис. 5.

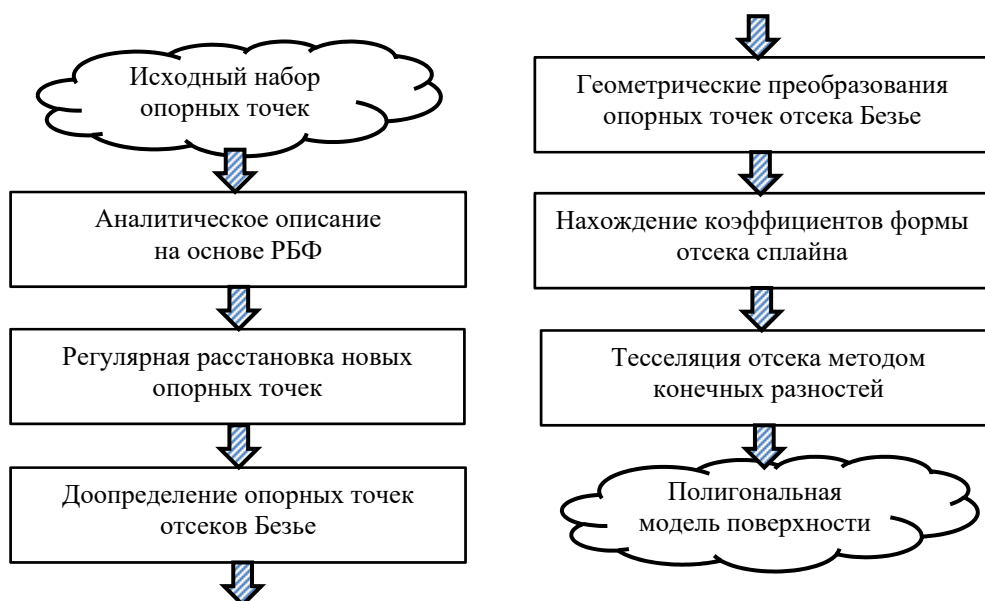


Рис. 5. Этапы технологии моделирования объектов интерфейса с неаналитической поверхностью

В качестве примера на рис. 6 показаны фрагменты интерфейса системы слежения за подвижными транспортными средствами с привязкой к рельефу местности.

Модель рельефа построена путем программной интерполяции с использованием смешивающих функций [22, 23]. Для повышения информативности реалистическое изображение интерфейсных объектов дополняется вспомогательными текстовыми и графическими фрагментами. На рис. 6,а это

условные обозначения над объектами, на рис. 6,б – это траектория движения транспортного средства.

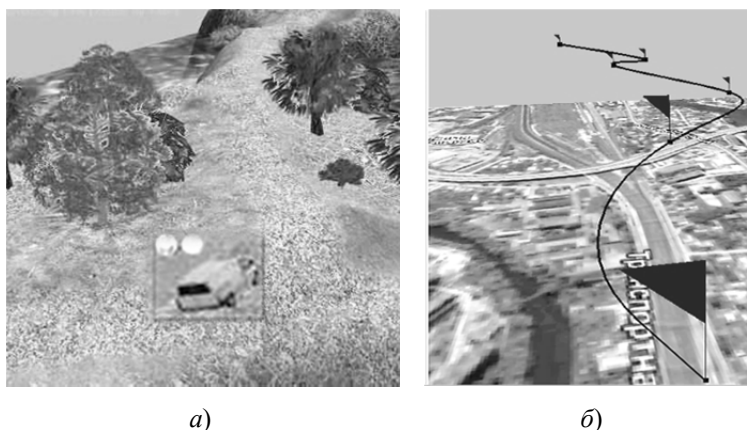


Рис. 6. Фрагменты интерфейсов систем слежения за наземным (а) и воздушным (б) транспортными средствами

Предложенная двухэтапная технология представления интерфейсных объектов ЭИС как элементов виртуального окружения показывает хорошие изобразительные возможности и обеспечивает функционирование интерфейса в режиме РВ.

Библиографический список

1. Анохин, А. Н. Опыт и новые возможности в проектировании человеко-машинного интерфейса БПУ новых АЭС с ВВЭР / А. Н. Анохин, В. П. Сивоконь, О. Л. Боженов, Е. Н. Алонцева // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2010. – № 4 (36). – С. 62–72.
2. Мониторинг безопасности. Реализация с помощью компьютерных систем. – URL: <http://tele.med.ru/u14.htm>
3. Косников, Ю. Н. Развитие интегрального представления многопараметрических объектов / Ю. Н. Косников, О. П. Стреляная // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 2 (18). – С. 186–194.
4. Косников, Ю. Н. Моделирование объектов интерфейса виртуального окружения для эргатических систем / Ю. Н. Косников, Т. Х. Хоанг // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3. – С. 16–28.
5. Технологии виртуального прототипирования // Сайт «Компьютерные технологии и математическое моделирование в механике и машиностроении». – URL: <http://ctmech.ru/?mid=1&lng=RU>
6. Косников, Ю. Н. Моделирование и визуализация неаналитических поверхностей / Ю. Н. Косников, Тхай Хо Хоанг // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс : науч. период. изд. Серия: Технические науки. Информационные технологии. – Пенза : Изд-во ПГТУ, 2016. – № 6 (36). – С. 129–136.
7. Хоанг, Тхань Данг Нгок. Поверхностный интерполяционный метод на основе принципа наименьших квадратов / Данг Нгок Хоанг Тхань, Фан Зуй Тунг // Технические науки – от теории к практике : сб. ст. по материалам XXXVIII Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск : СибАК, 2014. – № 9 (34). – С. 6–15.
8. Dressler, M. Approximation. Interpolation of surfaces based on numerical tensioning and smoothing / M. Dressler. – URL: <http://www.sweb.cz/M.Dressler/ABOS.htm>

9. Самарский, А. А. Численные методы / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – М. : Наука, 1989. – 432 с.
10. Александрова, Н. В. Смешивающие функции в геометрическом моделировании и визуализации поверхностей свободных форм / Н. В. Александрова, А. П. Зимин, Ю. Н. Косников, Хоанг Тхай Хо // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс : науч. период. изд. Серия: Технические науки. Информационные технологии. – Пенза : Изд-во ПГТУ, 2015. – № 03 (25), т. 1. – С. 51–60.
11. Роджерс, Д. Математические основы машинной графики / Д. Роджерс, Дж. Адамс. – М. : Мир, 2001. – 604 с.
12. Akima, H. A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for values given at irregularly distributed points / H. Akima // OT Report 75-70, U.S. Dept. of Commerce / Office of Telecommunications, Boulder, Colo., – 1975. – 55 p.
13. Reconstruction and Representation of 3D Objects with Radial Basis Functions / J. C. Carr, R. K. Beatson, J. B. Cherrie, T. J. Mitchell, W. R. Fright, B. C. McCallum, T. R. Evans // Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 2001. – P. 67–76.
14. Wright, G. B. Radial Basis Function Interpolation: Numerical and Analytical developments / G. B. Wright // University of Colorado, 2003. – 360 p.
15. Anjyo, K. Scattered data interpolation for computer graphics / K. Anjyo, J. P. Lewis, F. Pighin // SIGGRAPH 2014 Course. – Canada, Vancouver. – 2014. – 69 с.
16. Skala, V. A Practical Use of Radial Basis Functions Interpolation and Approximation / V. Skala // Revista de Investigacion Operacional. – 2016 – Vol. 37(2). – P. 137–145. – URL: <http://rev-inv-ope.univ-paris1.fr/volumes-since-2000/volume-37-2016/>
17. Косников, Ю. Н. Методика и технология компьютерного моделирования поверхностей свободных форм с применением радиальных базисных функций / Ю. Н. Косников // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс : науч. период. изд. Серия: Технические науки. Информационные технологии. – Пенза : Изд-во ПГТУ, 2014. – № 03 (19). – С. 176–183.
18. Фокс, А. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве / А. Фокс, М. Пратт. – М. : Мир, 1982. – 304 с.
19. Шикин, Е. В. Кривые и поверхности на экране компьютера : руководство по сплайнам для пользователей / Е. В. Шикин, А. И. Плис. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 1996. – 240 с.
20. Херн, Д. Компьютерная графика и стандарт OpenGL ; пер с англ. / Д. Херн, М. П. Бейкер – 3-е изд. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2005. – 1168 с.
21. Косников, Ю. Н. Применение бикубических сплайнов в графических системах реального времени / Ю. Н. Косников // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2005. – № 4 (9). – С. 30–36.
22. Косников, Ю. Н. Программа визуализации иерархического информационного пространства на экране монитора / Ю. Н. Косников, В. С. Власов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013611277 от 9 января 2013 г.
23. Косников, Ю. Н. Программа геометрического моделирования и визуализации протяженных геометрических форм с применением радиальных базисных функций / Ю. Н. Косников, Т. Х. Хоанг // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613102 от 02.03.2018 г.

References

1. Anokhin A. N., Sivokon' V. P., Bozhenkov O. L., Alontseva E. N. *Yadernye izmeritel'no-informatsionnye tekhnologii* [Nuclear measurement and information technologies]. 2010, no. 4 (36), pp. 62–72.
2. *Monitoring bezopasnosti. Realizatsiya s pomoshch'yu komp'yuternykh system* [Security monitoring. The implementation of using computer systems]. Available at: <http://tele.med.ru/u14.htm>

3. Kosnikov Yu. N., Strelyanaya O. P. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in Economics, technology, nature and society]. 2016, no. 2 (18), pp. 186–194.
4. Kosnikov Yu. N., Khoang T. Kh. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [News of higher educational institutions. Volga region. Technical science]. 2016, no. 3, pp. 16–28.
5. Sayt «Komp'yuternye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v mekhanike i mashinostroenii» [Virtual prototyping technologies // website "Computer technologies and mathematical modeling in mechanics and mechanical engineering"]. Available at: <http://ctmech.ru/?mid=1&lng=RU>
6. Kosnikov Yu. N., Khoang Tkhai Kho *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus: nauch. period. izd. Seriya: Tekhnicheskie nauki. Informatsionnye tekhnologii* [XXI century: results of the past and problems of the present plus: scientific. period. ed. Series: Technical Sciences. Information technology]. Penza : Izd-vo PGUTU, 2016, no. 6 (36), pp. 129–136.
7. Khoang Tkhai Dang Ngok, Tung Fan Zuy *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike: sb. st. po materialam XXXVIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Technical science – from theory to practice : collection of articles on materials of the XXXVIII Intern. scientific.- prakt. Conf]. Novosibirsk: SibAK, 2014, no. 9 (34), pp. 6–15.
8. Dressler M. *Approximation. Interpolation of surfaces based on numerical tensioning and smoothing*. Available at: <http://www.sweb.cz/M.Dressler/ABOS.htm>
9. Samarskiy A. A., Gulin A. V. *Chislennyye metody* [Numerical method]. Moscow: Nauka, 1989, 432 p.
10. Aleksandrova N. V., Zimin A. P., Kosnikov Yu. N., Khoang Tkhai Kho *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus: nauch. period. izd. Seriya: Tekhnicheskie nauki. Informatsionnye tekhnologii* [XXI century: results of the past and problems of the present plus: scientific. period. ed. Series: Technical Sciences. Information technology]. Penza: Izd-vo PGUTU, 2015, vol. 1, no. 03 (25), pp. 51–60.
11. Rodzhers D., Adams Dzh. *Matematicheskie osnovy mashinnoy grafiki* [Mathematical foundations of computer graphics]. Moscow: Mir, 2001, 604 p.
12. Akima H. *OT Report 75-70, U.S. Dept. of Commerce*. Office of Telecommunications, Boulder, Colo., 1975, 55 p.
13. Carr J. C., Beatson R. K., Cherrie J. B., Mitchell T. J., Fright W. R., McCallum B. C., Evans T. R. *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 2001, pp. 67–76.
14. Wright G. B. *Radial Basis Function Interpolation: Numerical and Analytical developments*. University of Colorado, 2003, 360 p.
15. Anjyo K., Lewis J. P., Pighin F. *SIGGRAPH 2014 Course*. Canada, Vancouver. 2014, 69 p.
16. Skala V. *Revista de Investigacion Operacional* [Operational Research Journal]. 2016, vol. 37 (2), pp. 137–145. Available at: <http://rev-inv-ope.univ-paris1.fr/volumes-since-2000/volume-37-2016/>
17. Kosnikov Yu. N. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus: nauch. period. izd. Seriya: Tekhnicheskie nauki. Informatsionnye tekhnologii* [XXI century: results of the past and problems of the present plus: scientific. period. ed. Series: Technical Sciences. Information technology]. Penza: Izd-vo PGUTU, 2014, no. 03 (19), pp. 176–183.
18. Foks A., Pratt M. *Vychislitel'naya geometriya. Primenenie v proektirovanii i na proizvodstve* [Computational geometry. Application in design and manufacturing]. Moscow: Mir, 1982, 304 p.
19. Shikin E. V., Plis A. I. *Krivyye i poverkhnosti na ekrane komp'yutera: rukovodstvo po splaynam dlya pol'zovateley* [Curves and surfaces on the computer screen: user's guide to splines]. Moscow: DIALOG-MIFI, 1996, 240 p.

20. Khern D., Beyker M. P. *Komp'yuternaya grafika i standart OpenGL; per s angl.* [Computer graphics and OpenGL standard; pen with English]. 3rd ed. Moscow: Izd. dom «Vil'yams», 2005, 1168 p.
21. Kosnikov Yu. N. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Saratov state technical University]. 2005, no. 4 (9), pp. 30–36.
22. Kosnikov Yu. N., Vlasov V. S. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2013611277 ot 9 yanvarya 2013 g.* [Certificate of state registration of computer programs № 2013611277 from January 9, 2013].
23. Kosnikov Yu. N., Khoang T. Kh. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2018613102 ot 02.03.2018 g.* [Certificate of state registration of computer programs № 2018613102 from 02.03.2018].

Косников Юрий Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-
вычислительных систем,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kosnikov@gmail.com

Kosnikov Yuriy Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information
and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кольчугина Елена Анатольевна

доктор технических наук, профессор,
кафедра математического обеспечения
и применения ЭВМ,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kea@pnzgu.ru

Kol'chugina Elena Anatol'evna

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of mathematical support
and computer applications,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.942

Косников, Ю. Н.

Технологии виртуального окружения в интерфейсах экономических информационных систем / Ю. Н. Косников, Е. А. Кольчугина // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 3 (27). – С. 82–95.