

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ИНТЕРФЕЙСА ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ ДЛЯ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Объектом исследования является реконструкция формы объектов интерфейсного пространства по множеству характерных точек. Предмет исследования – методы геометрического моделирования неаналитических поверхностей с применением смешивающих функций. Целью работы является представление научных принципов геометрического моделирования и отображения объектов интерфейса «человек – компьютер» на основе применения смешивающих функций.

*Материалы и методы.* Предлагается двухэтапное моделирование геометрической формы пространственных объектов с применением смешивающих функций радиального и ортогонального базиса.

*Результаты.* Предложена методика геометрического моделирования пространственных объектов, включающая следующие этапы: создание модели поверхности объекта по исходному набору опорных точек с применением радиальных базисных функций, замена исходных опорных точек на новые – равномерно расставленные на поверхности, построение модели поверхности на основе смешивающих функций ортогонального базиса, переход к конечным разностям. Применение методики обеспечивает высокую производительность графической системы компьютера в сочетании с хорошими изобразительными возможностями. Применение перечисленных принципов позволяет строить пространственные объекты произвольной формы для интерфейсов виртуального окружения в системах управления и обработки информации различного назначения.

*Выводы.* Упорядоченное размещение опорных точек упрощает алгоритм перехода к полигональному представлению объекта. Применение смешивающих функций ортогонального базиса позволяет применить быстрый алгоритм вычисления вершин и нормалей полигональной модели на основе конечных разностей. Перечисленные приемы помогают обеспечить высокую производительность вычислений в сочетании с хорошими изобразительными возможностями и экономией памяти графической системы.

**Ключевые слова:** человеко-машинный интерфейс, виртуальное окружение, опорная точка, интерполяция, смешивающая функция, радиальный базис, ортогональный базис, конечная разность.

Yu. N. Kosnikov, Khoang Tkhay Kho

## MODELING OF VIRTUAL ENVIRONMENT INTERFACE OBJECTS FOR ERGATIC SYSTEMS

### Abstract.

*Background.* The research object is reconstruction of forms of interface environment objects by multiple characteristic points. The research subject is methods of geometric modeling of nonanalytical surfaces using mixing functions. The aim of the research is to introduce scientific principles of geometric modeling and imaging of objects of the “human-computer” interface on the basis of mixing functions.

*Materials and methods.* The article suggests two-stage modeling of a geometric form of spatial objects using mixing functions of radial and orthogonal bases.

*Results.* The authors have suggested a method of geometric modeling of spatial objects including the following stages: creation of an object's surface model by an initial set of control points using radial basis functions, substitution of initial control points by new ones – equally distributed on the surface, building of a surface model using mixing functions of the orthogonal basis, switching to finite differences. Application of the described principles allows to build spatial objects of arbitrary shape for virtual environment interfaces in various data control and processing systems.

*Conclusions.* Ordered distribution of control points simplifies the algorithm of transition to the polygonal object presentation. Application of mixing functions of the orthogonal basis allows to use a fast algorithm for calculation of vertexes and normals of a polygonal model on the basis of finite differences. The described methods provide high performance of calculations in combination with high graphic capacities and storage efficiency of graphic systems.

**Key words:** human-computer interface, virtual environment, control point, interpolation, mixing function, radial basis, orthogonal basis, finite difference.

### Введение

Современные эргатические системы характеризуются высокой сложностью и, зачастую, должны функционировать в режиме реального времени (РВ). Человек в таких системах испытывает большую психофизиологическую нагрузку, что может привести к снижению эффективности его работы. Эргатические системы, как правило, имеют компьютерную поддержку, поэтому человек взаимодействует с элементами системы через человеко-машинный интерфейс. В настоящее время осуществляется переход от традиционных WIMP-интерфейсов к интерфейсам нового типа, построенным на основе речевого, жестового, тактильного, биометрического взаимодействия человека с компьютером.

Для визуального представления объектов интерфейса все шире применяются принципы виртуальной реальности. Виртуальная реальность является одной из форм человеко-машинного интерфейса. Цель применения такого интерфейса – комплексно воздействуя на органы чувств человека, погрузить его в созданную компьютером среду высокой реалистичности. Решение прикладных задач зачастую не требует такого погружения, но, в то же время, человек лучше понимает ситуацию в эргатической системе, если ее элементы имеют знакомые из реального мира вид и поведение. В этом случае эффективной средой взаимодействия человека с элементами системы является интерфейс виртуального окружения (ИВО), создаваемый средствами геометрического моделирования и компьютерной графики. В нем могут комбинироваться условные и реалистичные образы объектов, дополняемые традиционными средствами интерфейса – обозначениями, надписями, навигаторами и т.д. Проектирование ИВО – важная и сложная многоплановая задача, от качества решения которой во многом зависит эффективность функционирования эргатической системы.

#### 1. Требования к математическим моделям объектов интерфейса

Средствами интерфейса человеку представляется информация о поведении самых различных рукотворных и природных объектов. Например, при

решении таких задач, как проектирование сооружений и коммуникаций, мониторинг транспортных средств, компьютерное обучение навыкам пространственной навигации, управление воинскими подразделениями, интерфейсное пространство должно содержать объекты разнообразной геометрической формы. Для их описания необходимо использовать методы математического (геометрического) моделирования. Наиболее сложной задачей является моделирование объектов неаналитической формы, например, рельефа местности и других природных объектов. Их форма описывается скалярным полем, т.е. пространственным набором характерных (опорных) точек. Опорные точки могут быть получены путем замеров, вычислений, обработки 3D-сканером реальных объектов, указания специалистом-разработчиком. Поверхность объекта по его опорным точкам реконструируется с помощью интерполяции.

Из математики известно множество методов построения интерполяционных моделей, однако в рассматриваемом случае назначение объектов интерполяции накладывает ограничения на выбор методов. Интерполяционные модели объектов интерфейса подлежат дальнейшей визуализации и должны быть узнаваемыми. В связи с этим к моделям предъявляются следующие требования:

- точное прохождение поверхности объекта через опорные точки;
- гладкость поверхности;
- отсутствие у поверхности феномена Рунге (осцилляций);
- возможность повысить реалистичность изображения объекта известными приемами компьютерной графики;
- возможность применить быстрые алгоритмы перехода от непрерывной поверхности к ее полигональному представлению, поддерживаемому графической системой компьютера.

Еще одним требованием является по возможности малая ресурсоемкость моделей как на этапе их хранения в памяти компьютера, так и на этапе вывода на поле отображения. Это требование связано с тем, что формирование интерфейса является важной, но не единственной задачей эргатической системы. Ее основной задачей является сбор данных, их обработка, выработка решений и управляющих воздействий и т.д., т.е. выполнение работы, для которой система тематически предназначена.

## **2. Методы геометрического моделирования на основе смешивающих функций**

Традиционные методы полиномиальной интерполяции плохо подходят для моделирования объектов ИВО. Они требуют больших вычислительных затрат и дают поверхность с осцилляциями. Более приемлемые результаты дают методы на основе смешивающих функций (СФ). Суть этих методов в том, что координаты текущей точки поверхности находятся путем суммирования (смешивания) «вкладов», которые вносят опорные точки [1]. Величины этих «вкладов» функционально зависят от расстояний между текущей точкой и опорными точками. В различных методах используются различные функциональные зависимости от расстояний (различные смешивающие функции).

Самой простой интерполяционной моделью поверхности является полигональная сетка, в которой опорные точки скалярного поля становятся вершинами полигонов. Такая модель хранится в памяти вычислительной системы в виде набора опорных точек и заранее вычисленных для этих точек

нормалей к поверхности. Операции обработки (динамика, текстурирование, затенение) полигональной модели просты и поддерживаются графическим процессором вычислительной системы. На этапе вывода модели на поле отображения вычислительная система использует именно полигональную сетку. С этой точки зрения полигональная интерполяция кажется предпочтительной: она сразу дает результат, пригодный для отображения. Однако при неравномерной или редкой расстановке опорных точек поверхность, полученная в результате полигональной интерполяции, имеет явно выраженные грани. Для повышения реалистичности формы число опорных точек нужно увеличивать, что приводит к росту затрат памяти на хранение модели и времени ее обработки. Тогда в случае информативно насыщенного интерфейса возникают сложности с обеспечением режима РВ.

### 3. Моделирование методами билинейной и сплайновой интерполяции

Просто строится модель поверхности на основе билинейной интерполяции. Поверхность составляется из четырехугольных отсеков, каждый из которых имеет в качестве угловых вершин 4 опорные точки скалярного поля. Описание отсека, как ясно из названия метода, содержит линейные СФ по каждой координатной оси и для отсека, построенного на опорных точках  $P_k(x_k, y_k, z_k)$  ( $k = 1, \dots, 4$ ), имеет вид

$$z = \frac{y_2 - y_1}{y_2 - y_1} \left( \frac{x_2 - x_1}{x_2 - x_1} z_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} z_2 \right) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \left( \frac{x_2 - x_1}{x_2 - x_1} z_3 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} z_4 \right).$$

Отсек в общем случае имеет криволинейную форму, что повышает изобразительные возможности модели.

Однако применение билинейной интерполяции не дает гладкой стыковки соседних отсеков поверхности. Действительно, билинейная поверхность является двулинейчатой: ее образующие в направлениях обеих координат-аргументов являются прямыми линиями. Тогда в любой точке на линии стыковки двух соседних отсеков будут сходиться две прямолинейные образующие: образующая первого отсека и образующая второго отсека. Сопряжение отсеков будет гладким, если наклоны этих образующих одинаковы, что возможно лишь в частных случаях.

Гладкую стыковку отсеков можно получить, применив сплайновую интерполяцию [2]. Точное прохождение поверхности через опорные точки и гладкую стыковку отсеков обеспечивает, например, интерполяция сплайнами Безье. Это известный инструмент геометрического моделирования, широко применяемый на практике. Однако сплайн-интерполяция имеет недостатки. Если опорные точки расположены в пространстве случайным образом, то для сплайна Безье алгоритмически сложно определить дополнительные вершины характеристического многогранника. Если же в качестве таких вершин использовать сами опорные точки, то поверхность Безье не будет точно проходить через эти вершины. Кроме того, бикубические СФ сплайнов достаточно сложны в вычислительном отношении.

### 4. Интерполяция R-примитивами

Более простой вид, по сравнению со сплайнами, имеют рельеф-примитивы (R-примитивы) [3]. Описание R-примитива имеет вид

$$z = \sum_{i=1}^N z_i b f_{x_i} b f_{y_i} , \quad (1)$$

где  $i$  – номер опорной точки;  $z_i$  – высота  $i$ -й опорной точки;  $b f_{x_i}$ ,  $b f_{y_i}$  – смешивающие функции  $i$ -й опорной точки, действующие вдоль координатных осей;  $N$  – количество опорных точек, влияние которых учитывается при построении отсека поверхности.

Координата  $z$  текущей точки находится как сумма взвешенных высот опорных точек, причем в качестве весовых коэффициентов выступают значения смешивающих функций. Эти значения пропорциональны расстояниям между текущей точкой и опорными точками. Область влияния каждой опорной точки определяется в плоскости аргументов  $x, y$ , т.е. «вклад» каждой опорной точки в координаты текущей точки определяется расстоянием между проекциями этих точек на плоскость  $x, y$ . Смешивающие функции  $i$ -й опорной точки  $R$ -примитива выглядят следующим образом:

$$b f_{x_i} = \begin{cases} \left( 1 - \frac{|x - x_i|}{A_x} \right)^{m_x} & \text{при } |x - x_i| < A_x, \\ 0 & \text{при } |x - x_i| \geq A_x, \end{cases} \quad (2)$$

$$b f_{y_i} = \begin{cases} \left( 1 - \frac{|y - y_i|}{A_y} \right)^{m_y} & \text{при } |y - y_i| < A_y, \\ 0 & \text{при } |y - y_i| \geq A_y, \end{cases} \quad (3)$$

где  $x_i$ ,  $y_i$  – координаты  $i$ -й опорной точки в плоскости аргументов;  $x$ ,  $y$  – координаты текущей точки в плоскости аргументов;  $m_x$ ,  $m_y$  – характеристики рельефа – это показатели степени, значения которых определяют характер рельефа отсека;  $A_x$ ,  $A_y$  – размеры области влияния  $i$ -й опорной точки вдоль координатных полуосей (положительных и отрицательных).

Смешивающие функции  $R$ -примитива обладают следующими свойствами:

– при совпадении проекции текущей точки с проекцией опорной точки ( $x = x_i$ ,  $y = y_i$ ) СФ этой опорной точки принимает единичное значение;

– при удалении текущей точки от опорной точки вдоль каждой координаты плоскости  $x, y$  «вклад» опорной точки по каждой координате уменьшается по степенному закону;

– при выходе текущей точки за границы области влияния опорной точки СФ этой опорной точки принимает нулевое значение.

Для применения  $R$ -примитива не нужно находить никаких дополнительных точек. Смешивающие функции  $R$ -примитива более просты, чем у сплайнов, а гладкая стыковка отсеков получается за счет расширения области влияния опорных точек. На рис. 1 показано расположение в декартовом пространстве двадцати опорных точек  $P_1, \dots, P_{20}$ . Для простоты представления принято, что их проекции на плоскость аргументов расставлены равномерно.

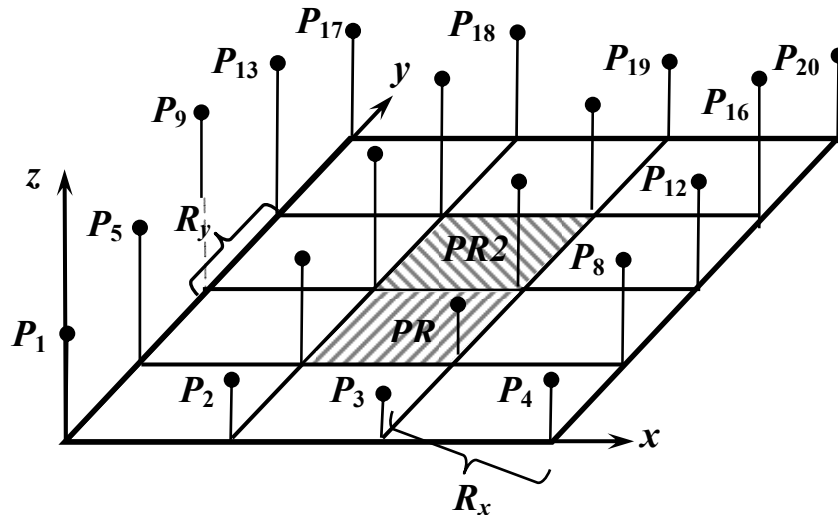


Рис. 1. Задание двух отсеков рельеф-примитива набором из двадцати опорных точек

Область влияния опорной точки предполагается равной двум шагам координатной сетки в направлении каждой координатной полуоси, на рис. 1 эти шаги координатной сетки обозначены  $R_x$ ,  $R_y$ . Проекции двух средних сопрягающихся отсеков поверхности на плоскость  $xy$  отмечены штриховкой и обозначениями  $PR1$ ,  $PR2$ . Характеристики рельефа выбраны равными двум. Тогда для вычисления высоты текущей точки первого ( $z_I$ ) и второго ( $z_{II}$ ) отсеков служат выражения

$$z_I = \sum_{i=1}^{16} z_i \left(1 - \frac{|x - x_i|}{2R_x}\right)^2 \left(1 - \frac{|y - y_i|}{2R_y}\right)^2, \quad (4)$$

$$z_{II} = \sum_{i=5}^{20} z_i \left(1 - \frac{|x - x_i|}{2R_x}\right)^2 \left(1 - \frac{|y - y_i|}{2R_y}\right)^2. \quad (5)$$

Вид  $R$ -примитивов, построенных по выражениям (4), (5) для некоторого набора опорных точек, показан на рис. 2 (получен в среде 3D-Grapher). Он демонстрирует гладкость сопряжения отсеков.

Интерполяция  $R$ -примитивами имеет один недостаток. В случае совпадения текущей точки с некоторой  $k$ -й опорной точкой ( $x = x_k$ ,  $y = y_k$ ) соответствующее слагаемое в математическом описании  $R$ -примитива принимает значение высоты  $z_k$   $k$ -й опорной точки. Однако другие слагаемые принимают не нулевые, а некоторые конечные значения, которые суммируются с  $z_k$ . В итоге вычисленное значение высоты в текущей точке не совпадает с высотой в  $k$ -й опорной точке.

Этот эффект относится ко всем опорным точкам. В результате поверхность, полученная путем интерполяции, не проходит через опорные точки. Чтобы устранить этот недостаток, нужно ввести масштабные коэффициенты,

индивидуальные для каждой опорной точки. Тогда модель отсека  $R$ -примитива принимает вид

$$z = \sum_{i=1}^N m_i z_i b f_{x_i} b f_{y_i} ,$$

где  $b f_{x_i}$ ,  $b f_{y_i}$  – значения смешивающих функций  $i$ -й опорной точки, действующих вдоль координатных осей;  $N$  – количество опорных точек, влияющих на текущую точку отсека.

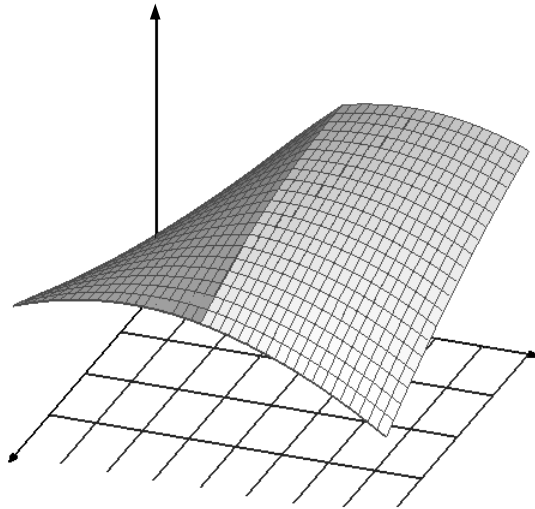


Рис. 2. Сопряжение двух отсеков в виде  $R$ -примитивов

Введя обозначение  $\lambda_i = m_i z_i$  и определив  $\lambda_i$  как коэффициент влияния  $i$ -й опорной точки, получим выражение

$$z = \sum_{i=1}^N \lambda_i b f_{x_i} b f_{y_i} , \quad (6)$$

которое при ближайшем рассмотрении оказывается сходным с описанием интерполяции на основе радиальных базисных функций.

### 5. Функции радиального и ортогонального базиса

Радиальные базисные функции (РБФ) широко используются для интерполяции функциональных зависимостей, но особенности их применения для последующей визуализации поверхностей в известных информационных источниках раскрыты недостаточно. Интерполянт на основе РБФ обычно описывается в декартовом пространстве в общей (неявной) форме:

$$F(x, y, z) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \varphi(r_i) = 0, \quad (7)$$

где  $\varphi(r_i)$  – значения РБФ для  $i$ -й опорной точки. Это значение зависит от декартова расстояния  $r_i$  между текущей точкой интерполируемой поверхности и  $i$ -й опорной точкой (т.е. от координат  $i$ -й опорной точки);  $\lambda_i$  – коэффициент влияния  $i$ -й опорной точки.

На основе (7) составляется система уравнений из условия прохождения интерполянта через определенные точки пространства. Для исключения тривиального решения системы уравнений в (7) добавляется полином малой степени [4]. Решение полученной системы уравнений позволяет найти коэффициенты влияния  $\lambda_i$  опорных точек для заданной ими поверхности. Подстановка  $\lambda_i$  в (7) дает аналитическое описание поверхности. Для визуализации поверхности с помощью (7) нужно найти набор принадлежащих ей промежуточных точек и сделать их вершинами полигональной сетки. Далее для каждой вершины нужно найти нормаль к поверхности. Нормали к поверхности нужны для моделирования ее освещения на этапе визуализации. Для нахождения нормали в вершине полигональной сетки нужно найти нормали ко всем полигонам, которым принадлежит эта вершина, а затем найти нормаль в вершине путем усреднения нормалей к полигонам. Полученное описание полигональной сетки (координаты вершин и нормальных векторов) передаются в графический процессор компьютера для визуализации.

Описанный алгоритм плохо подходит для моделирования и визуализации динамических объектов в режиме РВ. Для протяженных поверхностей, например рельефа местности, количество слагаемых в выражении (7) может достигать нескольких сотен, а известные разновидности РБФ (thin-plate spline, инверсный квадрат, инверсный мультиквадрат, гауссиан и др.) имеют в своем составе степенные и логарифмические функции, радикалы, дроби. Кроме того, при вычислении промежуточных точек поверхности, описанной в общей форме, приходится применять переборный метод. В соответствии с ним организуется обход по какому-то закону точек пространства, которые проверяются на принадлежность поверхности. Если при подстановке координат очередной точки в выражение (7) его левая часть принимает нулевое значение, точка принадлежит поверхности и может быть принята за очередную вершину полигональной сетки. Такой алгоритм полигонизации работает медленно и не может быть реализован в режиме РВ. Это означает, что формирование полигональной модели поверхности нужно выполнять заранее и далее работать с ней в режиме РВ. Однако полигональная модель протяженной поверхности характеризуется большим объемом памяти компьютера, необходимой для ее хранения, и большим временем геометрических преобразований (сдвиг, поворот, проецирование). В результате затраты компьютерных ресурсов растут, особенно в случае интерфейса большой информационной емкости.

Можно предложить вместо функций радиального базиса использовать в математической модели объекта смешивающие функции ортогонального базиса (СФОБ) и вернуться к описанию модели в виде выражения (6). Достоинство СФОБ в том, что их значения зависят от расстояний между текущей и опорными точками поверхности, вычисляемых отдельно по координатам-аргументам, например, в декартовом пространстве – по координатам  $x$  и  $y$  как в выражениях (2), (3). Если опорные точки расположены в узлах ортогональной координатной сетки и нахождение промежуточных точек идет вдоль



координатных линий, то значения СФОБ вычисляются по разностным формулам с помощью только операций суммирования [5]. Например, СФ  $bf_x$  вычисляется по выражениям

$$\Delta^k bf_{x(j+1)} = \Delta^k bf_{xj} + \Delta^{k+1} bf_{xj}, \quad k = 0, 1, \dots, \quad (8)$$

где  $\Delta^k bf_{xj}$  – конечная разность функции  $bf_x$  порядка  $k$  на  $j$ -м шаге вычисления, причем  $\Delta^0 bf_x \equiv bf_x$ .

Вычисления каждой конечной разности начинаются на нулевом шаге с некоторого начального значения  $\Delta_0^k bf_{xi}$ . Вычисления функции  $bf_y$  выполняются по аналогии с вычислением  $bf_x$ .

Применение СФОБ и разностных формул позволяет проводить полигонизацию поверхности в режиме РВ. Для реализации описанного подхода предлагается следующая методика.

### **6. Методика геометрического моделирования пространственных объектов интерфейса виртуального окружения**

На первом этапе моделирования по исходному набору опорных точек составляется модель поверхности с применением любых подходящих РБФ и методик моделирования. В информационных источниках описаны свойства различных РБФ [4, 6, 7], которые можно использовать на данном этапе.

Первый этап можно значительно упростить, если функция-интерполянт является однозначной. Тогда для ее описания можно применить явную или параметрическую форму. Для этого множество исходных опорных точек с помощью известных геометрических преобразований сдвига и поворота переводится в подходящую вспомогательную систему координат (ВСК) [8]. Для протяженных незамкнутых поверхностей подходит описание в декартовых координатах:

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^M \lambda_i \varphi(r_i), \quad r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, \quad (9)$$

где  $r_i$  – декартово расстояние между проекциями  $i$ -й опорной точки и текущей точки поверхности на плоскость аргументов;  $M$  – количество опорных точек.

Описание замкнутых поверхностей представляется, например, в сферических координатах  $\rho$  (полярный радиус),  $\varphi$  (азимутальный угол),  $\theta$  (полярный угол):

$$\rho(\varphi, \theta) = \sum_{i=1}^M \lambda_i \varphi(\alpha_i), \quad (10)$$

$$\alpha_i = \arccos(\cos \theta \cdot \cos \theta_i + \sin \theta \cdot \sin \theta_i \cdot \cos(\varphi - \varphi_i)),$$

где  $\varphi_i, \theta_i$  – сферические координаты  $i$ -й опорной точки;  $\alpha_i$  – угловое расстояние между текущей и опорной точками.

Коэффициенты влияния  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, M$ ) опорных точек находятся из условия прохождения поверхности через эти точки.

Если получить описание поверхности в виде однозначной функции в одной ВСК затруднительно, нужно ввести несколько координатных систем и в них разместить отдельные отсеки поверхности (отдельные подмножества опорных точек). Тогда возникает составная поверхность, отсеки которой необходимо стыковать между собой. Если учесть, что исходное множество опорных точек задается в мировой системе координат, то ВСК можно считать локальной системой координат графического объекта (СКО), как это обычно делается в системах компьютерной графики. Первый этап моделирования является предварительным, выполняется не в режиме РВ и по причине его важности может выполняться с участием человека.

На втором этапе исходный набор опорных точек заменяется новым набором, точки которого равномерно расставлены на поверхности аргументов СКО. Для этого поверхность аргументов ( $x, y$  или  $\varphi, \theta$ ) обходится с постоянным шагом и для каждого сочетания значений аргументов отыскиваются значения координаты  $z$  или  $\rho$  по выражениям (9), (10). Полученные тройки координат  $x, y, z$  или  $\varphi, \theta, \rho$  принимаются за координаты новых опорных точек и образуют новое описание поверхности в СКО. Путем сортировки по аргументам СКО опорные точки упорядочиваются в пространстве.

На третьем этапе в соответствии с выражением (6) строится модель поверхности на основе СФОБ. Вид СФОБ и размеры областей их влияния выбираются заранее исходя из требований к погрешности интерполяции. Например, эксперимент показывает, что хорошие результаты дают СФОБ вида

$$bf_{xi} = \begin{cases} 1 - \left( \frac{x - x_i}{A_x} \right)^2 & \text{при } |x - x_i| < A_x, \\ 0 & \text{при } |x - x_i| \geq A_x, \end{cases} \quad (11)$$

$$bf_{yi} = \begin{cases} 1 - \left( \frac{y - y_i}{A_y} \right)^2 & \text{при } |y - y_i| < A_y, \\ 0 & \text{при } |y - y_i| \geq A_y. \end{cases} \quad (12)$$

Применение таких СФ позволяет просто вычислять координаты нормалей к поверхности. Как известно, в случае явного описания поверхности координаты  $n_x, n_y, n_z$  нормали находятся из выражений:

$$n_x = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad n_y = \frac{\partial z}{\partial y}, \quad n_z = -1.$$

Выполнив необходимые действия над (6) с учетом (11), (12), получим выражения

$$n_x = \sum_{i=1}^N \lambda_i \overline{bf}_{xi} bf_{yi}, \quad n_y = \sum_{i=1}^N \lambda_i bf_{xi} \overline{bf}_{yi}.$$

В них входят и прежние СФ (11), (12) и СФ другого вида:

$$\overline{bf}_{xi} = \frac{2(x_i - x)}{A_x^2}, \quad \overline{bf}_{yi} = \frac{2(y_i - y)}{A_y^2}.$$

Таким образом, описания поверхности и нормали к этой поверхности имеют идентичную структуру.

Четвертый этап оперирует конечно-разностной моделью поверхности объекта. Предварительно вычисляются начальные значения конечных разностей, входящих в описание поверхности, и нормалей в ее точках. Затем в режиме РВ по формулам вида (8) осуществляется вычисление координат промежуточных точек поверхности и нормалей в этих точках. Полученные точки принимаются за вершины полигональной модели поверхности.

Множество вершин и нормалей передается в процессор графического адаптера компьютера. Вместе с ними в графический процессор передаются параметры размещения СКО в исходной (мировой) системе координат. Графический процессор вычисляет текущие положения вершин и нормалей полигональной модели объекта в соответствии с параметрами размещения объекта в мировой системе координат и параметрами динамики объекта в процессе его пространственных эволюций.

### **Заключение**

Описание объекта ограниченным множеством опорных точек экономит память графической системы. Упорядоченное размещение опорных точек упрощает алгоритм перехода к полигональному представлению объекта. Применение СФОВ позволяет применить быстрый алгоритм вычисления вершин и нормалей полигональной модели на основе конечных разностей. Перечисленные приемы помогают обеспечить высокую производительность вычислений в сочетании с хорошими изобразительными возможностями и экономией памяти графической подсистемы эргатической системы.

### **Список литературы**

1. **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. – 2015. – Т. 1, № 03 (25). – С. 51–60.
2. **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.
3. **Kosnikov, Yu. N.** The integrated primitives application for mapping three-dimensional objects in real-time mode // Actual Problems of Aviation and Aerospace Systems. – 2000. – № 2 (10). – P. 37–42.
4. 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 // SIGGRAPH '01 Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 2001. – P. 67–76.
5. **Kosnikov, Yu. N.** Increasing the information capacity of the interface of the control system for multyparametric objects / Yu. N. Kosnikov // Application of Information and Communication Technologies – AICT2015 : 9th International Conference, Conference

- Proceedings (Russia, Rostov-on-Don, 14–16 October 2015). – Rostov-on-Don, 2015. – P. 446–449.
6. Interpolating Implicit Surfaces From Scattered Surface Data Using Compactly Supported Radial Basis Functions / B. S. Morse, T. S. Yoo, P. Rheingans, D. T. Chen, K. R. Subramanian // Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications (SMI '01). – M., 2001. – P. 92–102.
  7. **Суомо, С.** Surface Reconstruction from Scattered Point via RBF Interpolation on GPU / S. Cuomo, A. Galletti, G. Giunta, A. Starace // Proceedings of the 2013 Federated Conference on Computer Science and Information Systems. – M., 2013. – P. 433–440.
  8. **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: Периодическое научное издание. Сер. Технические науки. Информационные технологии. – 2014. – № 03 (19). – С. 176–183.

### References

1. Aleksandrova N. V., Zimin A. P., Kosnikov Yu. N., Khoang Tkhay Kho *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2015, vol. 1, no. 03 (25), pp. 51–60.
2. Kosnikov Yu. N. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Saratov State Technical University]. 2005, no. 4 (9), pp. 30–36.
3. Kosnikov Yu. N. *Actual Problems of Aviation and Aerospace Systems*. 2000, no. 2 (10), pp. 37–42.
4. Carr J. C., Beatson R. K., Cherrie J. B., Mitchell T. J., Fright W. R., McCallum B. C., Evans T. R. *SIGGRAPH '01 Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 2001, pp. 67–76.
5. Kosnikov Yu. N. *Application of Information and Communication Technologies – AICT2015: 9th International Conference, Conference Proceedings (Russia, Rostov-on-Don, 14–16 October 2015)*. Rostov-on-Don, 2015, pp. 446–449.
6. Morse B. S., Yoo T. S., Rheingans P., Chen D. T., Subramanian K. R. *Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications (SMI '01)*. Moscow, 2001, pp. 92–102.
7. Cuomo S., Galletti A., Giunta G., Starace A. *Proceedings of the 2013 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. Moscow, 2013, pp. 433–440.
8. Kosnikov Yu. N. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus: Periodicheskoe nauchnoe izdanie. Ser. Tekhnicheskie nauki. Informatsionnye tekhnologii* [XXI century: results of the past and problems of the present plus: a scientific periodical. Series: Engineering sciences. Information technologies]. 2014, no. 03 (19), pp. 176–183.

---

#### **Косников Юрий Николаевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой информационно-  
вычислительных систем, Пензенский  
государственный университет (Россия,  
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: jkos@pnzgu.ru

#### **Kosnikov Yuriy Nikolaevich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
head of sub-department of data-processing  
systems, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Хоанг Тхай Хо**

аспирант, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: hoangthaiho@gmail.com

**Khoang Tkhay Kho**

Postgraduate student, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

---

УДК 004.925.83 :: 004.946

**Косников, Ю. Н.**

**Моделирование объектов интерфейса виртуального окружения для эргатических систем** / Ю. Н. Косников, Хоанг Тхай Хо // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 16–28. DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-2