

Для расчета импульсной характеристики $\tilde{k}(n_1, n_2)$ обратного фильтра применялась операция комбинационной сборки [3].

$$\tilde{k}(n_1, n_2) = \sum_{j=0}^3 b_j (q * k(n_1, n_2))^{*j},$$

где $b_0 = 4$, $b_1 = -6$, $b_2 = 4$, $b_3 = -1$.

Восстановленное изображение $\tilde{f}(n_1, n_2) = \tilde{k} * \tilde{g}(n_1, n_2)$ приведено на рис. 3. Время обработки изображения на МК ПС-2000 с 16 процессорными элементами составило 5 с. Для сравнения: аналогичная обработка на ЭВМ ЕС 1061 заняла 39,5 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Школьник К. М. Технологическая поддержка ПС-2000 в системе ОБРАЗ // Теоретические и прикладные вопросы параллельной обработки информации.— Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1984.
2. McClellan J. H. The design of two-dimensional digital filters by transformations // Proc. 7th Annual Princeton Conference on Information Sciences and Systems.— USA, 1973.— P. 247.
3. Зюзин М. В. Алгоритм сборки обратных фильтров // Автометрия.— 1987.— № 4.
4. Зюзин М. В. Экономичный способ сборки двумерных цифровых фильтров в задаче обработки изображений // Вариационно-разностные методы в задачах численного анализа.— Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1987.

Поступила в редакцию 16 июля 1987 г.

УДК 681.3.06

А. М. КОВАЛЕВ, Ю. В. ТАРАСОВ

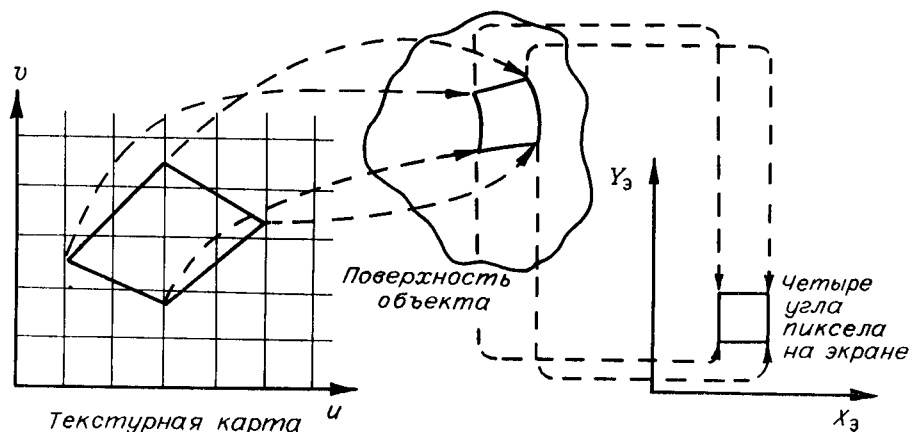
(Новосибирск)

ТЕКСТУРА НА ПРОИЗВОЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Введение. Термин «текстура» определяется в машинной графике как многомерное изображение, которое переносится (отображается) на многомерное пространство [1]. В данной статье это понятие имеет более узкий смысл — двумерный массив изображения (текстурная карта), отображаемый на трехмерную плоскость. Перенос текстуры на поверхность является одним из средств повышения реализма синтезируемой сцены в системах машинной графики. Текстура значительно повышает визуальную сложность изображения при относительно малом увеличении количества вычислений. С помощью текстуры можно моделировать цвет поверхности, зеркальное отражение, прозрачность и другие эффекты. Перед авторами статьи стояла задача разработать способ отображения текстуры, который был бы простым в аппаратной реализации.

При отображении текстуры приходится решать две проблемы: геометрического отображения массива текстуры на поверхность и фильтрации изображения, которая устраняет на рисунке ступенчатые линии, муары и т. д. — все, что в литературе по машинной графике обозначается термином «элайсинг».

Способ отображения образца текстуры на поверхность путем прямой свертки рассмотрен в [2] (рис. 1). Образец текстуры представляется массивом чисел (например, интенсивностей). Четыре угла пиксела (элемента изображения, в данном случае прямоугольной формы), заданные в системе координат экрана с осями X_s , Y_s , проецируются на текстурную карту. Элементы текстурной карты (текселы), попавшие в проекцию пиксела, суммируются с некоторым весом, и полученное значение берется как интенсивность пиксела. В системах реального времени про-



карты разного уровня детализации, которые генерируются из исходной текстурной карты с помощью фильтра с симметричной апертурой. При переходе с уровня на уровень разрешение текстурных карт уменьшается вдвое по каждой координате. Выборка текстурного значения производится из текстурной карты пужного уровня детализации, который определяется размером проекции пиксела на поверхность.

В [3] предложен следующий подход. Пиксел рассматривается как круг, проекция которого на плоскость представляет собой эллипс. В качестве параметра для определения уровня детализации выбирается полусумма длин осей эллипса. Для того чтобы при переходе от одной текстурной карты к другой не возникало элайсилга, пиксел разбивается на 16 подпикселов, каждый из которых проецируется на текстурную карту. Однако это значительно увеличивает количество вычислений.

Для плавного перехода в пирамиде от одной текстурной карты к другой Вильямс [4] предложил «трилинейную» интерполяцию: внутри текстурной карты некоторого уровня детализации проводится билинейная интерполяция по четырем точкам, а между текстурными картами соседнего уровня — линейная интерполяция. Вильямс исходил из того, что форма пиксела является квадратом. В этом случае проекцией пиксела на плоскость будет произвольный четырехугольник, различные функции от длин диагоналей которого используются в качестве параметра для определения уровня детализации. Недостаток этого подхода заключается в необходимости находить обратную проекцию четырех точек при обработке каждого пиксела.

Для алгоритмов растривания путем построчного сканирования в методе, рассмотренном в [3], достаточно вычисления проекций только четырех точек на пиксел, а в методе [4] — одной точки. Но при этом обработка каждого пиксела зависит по времени от обработки соседних пикселов. Это неприемлемо для систем машинной графики реального времени с множеством процессоров, которые обрабатывают пикселы параллельно и независимо.

В основе предлагаемого способа отображения текстуры лежит обобщение рассмотренных выше подходов: 1) производится сканирование в экранной системе координат и обратное проецирование на текстурированную плоскость; 2) пиксел представляется как круг; 3) формируется «пирамида» текстурных карт различной степени детализации, между которыми производится трилинейная интерполяция.

Имеются и изменения по сравнению с традиционной техникой:

1) вычисляется проекция только одной точки — центра пиксела;

2) в качестве параметра для определения уровня детализации берется наибольший размер проекции круга на плоскость; 3) интерполяция внутри текстурной карты производится по трем точкам.

Геометрическое отображение текстуры. Для параметрического описания плоскости достаточно задать на ней текстурные орты U и V и точку привязки. Задача состоит в том, чтобы, зная координаты экрана X_3, Y_3 , получить текстурные координаты U, V соответствующей точки плоскости в системе координат наблюдателя. В [1] показано, что это преобразование может быть записано в матричном виде:

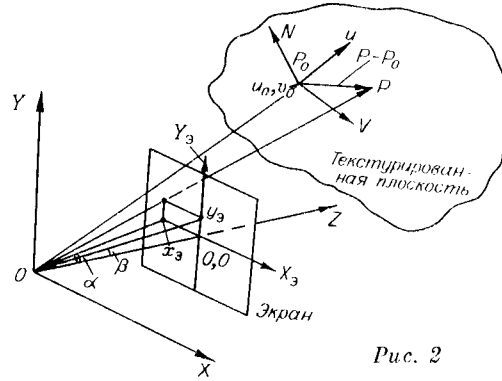


Рис. 2

$$[UW, VW, W] = [X_3, Y_3, 1] \times \begin{bmatrix} A & D & G \\ B & E & H \\ C & F & I \end{bmatrix}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} U &= (AX_3 + BY_3 + C)/(GX_3 + HY_3 + I); \\ V &= (DX_3 + EY_3 + F)/(GX_3 + HY_3 + I). \end{aligned} \quad (1)$$

Для определения коэффициентов матрицы рассмотрим произвольную плоскость в системе координат наблюдателя (рис. 2). Уравнение плоскости можно задать в виде

$$NP + d = 0, \quad (2)$$

где N — нормаль к плоскости с компонентами N_x, N_y, N_z ; P — точка плоскости с координатами P_x, P_y, P_z ; d — расстояние от начала системы координат до плоскости.

Пусть в точке $P_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ плоскости заданы текстурные координаты U_0, V_0 и единичные векторы $U = (U_x, U_y, U_z)$ и $V = (V_x, V_y, V_z)$, определяющие текстурную систему координат на плоскости. Тогда текстурные координаты любой точки $P = (X, Y, Z)$, принадлежащей рассматриваемой плоскости, можно записать в виде

$$\begin{cases} U_p = U_0 + (P - P_0)U; \\ V_p = V_0 + (P - P_0)V. \end{cases} \quad (3)$$

Точка $P = (x, y, z)$ есть проекция центра пиксела экрана с угловыми координатами α, β на плоскость (2). Она одновременно принадлежит текстурируемой поверхности и лучу зрения, который образован пересечением двух плоскостей:

$$\begin{cases} X = Z \operatorname{tg} \alpha = Z\Delta_x X_3; \\ Y = Z \operatorname{tg} \beta = Z\Delta_y Y_3, \end{cases} \quad (4)$$

где $\Delta_x = (2/M) \operatorname{tg}(\alpha_{\max}/2)$, $\Delta_y = (2/N) \operatorname{tg}(\beta_{\max}/2)$ — интервалы выборки по осям X_3 и Y_3 соответственно; M, N — разрешение экрана по горизонтали и вертикали; $\alpha_{\max}, \beta_{\max}$ — углы обзора по горизонтали и вертикали.

Из (2) с учетом (4) можно найти координаты точки P :

$$\begin{aligned} X &= (-d\Delta_x X_3)/(N_x\Delta_x X_3 + N_y\Delta_y Y_3 + N_z); \\ Y &= (-d\Delta_y Y_3)/(N_x\Delta_x X_3 + N_y\Delta_y Y_3 + N_z); \\ Z &= (-d)/(N_x\Delta_x X_3 + N_y\Delta_y Y_3 + N_z). \end{aligned} \quad (5)$$

Из (3) и (5) следует

$$\begin{cases} U_p = U'_0 - d(U_x \Delta_x X_0 + U_y \Delta_y Y_0 + U_z) / (N_x \Delta_x X_0 + N_y \Delta_y Y_0 + N_z); \\ V_p = V'_0 - d(V_x \Delta_x X_0 + V_y \Delta_y Y_0 + V_z) / (N_x \Delta_x X_0 + N_y \Delta_y Y_0 + N_z), \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} U'_0 &= U_0 - U_x X_0 - U_y Y_0 - U_z Z_0; \\ V'_0 &= V_0 - V_x X_0 - V_y Y_0 - V_z Z_0. \end{aligned}$$

Запишем (6) в форме (1):

$$\begin{cases} U_p = (U'_x \Delta_x X_0 + U'_y \Delta_y Y_0 + U'_z) / (N_x \Delta_x X_0 + N_y \Delta_y Y_0 + N_z); \\ V_p = (V'_x \Delta_x X_0 + V'_y \Delta_y Y_0 + V'_z) / (N_x \Delta_x X_0 + N_y \Delta_y Y_0 + N_z), \end{cases} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} U'_x &= N_x U'_0 - dU_x; & V'_x &= N_x V'_0 - dV_x; \\ U'_y &= N_y U'_0 - dU_y; & V'_y &= N_y V'_0 - dV_y; \\ U'_z &= N_z U'_0 - dU_z; & V'_z &= N_z V'_0 - dV_z. \end{aligned}$$

Сравнив (1) и (7), нетрудно определить значения коэффициентов матрицы преобразования:

$$\begin{aligned} A &= U'_x \Delta_x; & D &= V'_x \Delta_x; & G &= N_x \Delta_x; \\ B &= U'_y \Delta_y; & E &= V'_y \Delta_y; & H &= N_y \Delta_y; \\ C &= U'_z; & F &= V'_z; & I &= N_z. \end{aligned}$$

Фильтрация текстуры. Для систем реального времени применяется метод предфильтрации текстуры. Для этого из исходной текстурной карты с разрешением $2^n \times 2^n$ текселов формируются текстурные карты $n + 1$ уровней детализации:

Номер уровня детализации	Размер текстурной карты
1	$2^n \times 2^n$
2	$2^{n-1} \times 2^{n-1}$
3	$2^{n-2} \times 2^{n-2}$
⋮	⋮
⋮	⋮
⋮	⋮
n	2×2
$n + 1$	1×1

Текстурная карта уровня i получается из текстурной карты уровня $i - 1$ путем фильтрации карты уровня $i - 1$, например двумерным треугольным фильтром с размером основания 3×3 тексела, и снижения разрешения в 2 раза.

Рассмотрим выбор уровня детализации текстурной карты.

В общем случае проекция круглой апертуры на плоскость есть эллипс, большую ось которого возьмем в качестве диаметра S фильтра с двумерной симметричной апертурой. Размер эллипса зависит от интервала выборки $\Delta = \max(\Delta_x, \Delta_y)$, расстояния от наблюдателя до точки пересечения луча зрения с плоскостью D и угла наклона плоскости к лучу зрения.

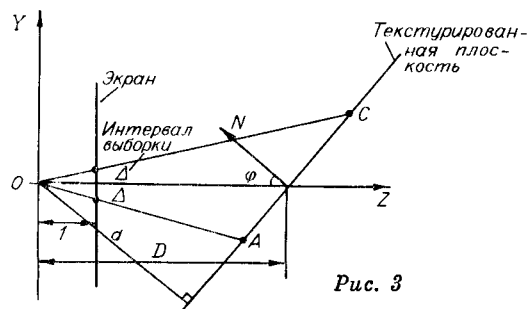


Рис. 3

Большая ось эллипса лежит на линии пересечения двух плоскостей. Одна из них — текстурованная плоскость, а другая — такая, что ей принадлежат и нормаль к плоскости, и луч зрения (рис. 3).

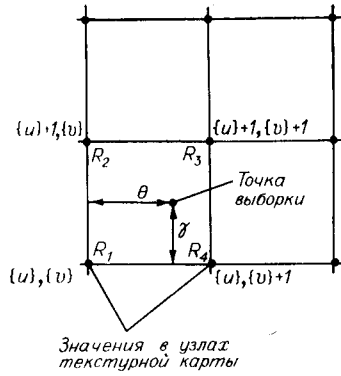


Рис. 4

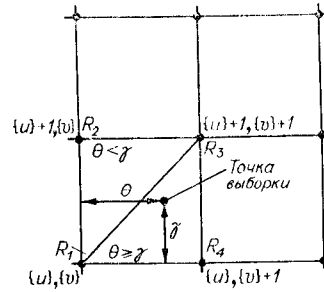


Рис. 5

Нетрудно показать, что большая ось эллипса

$$S = |AC| \approx 2\Delta D / \cos \varphi,$$

где φ — угол между нормалью к плоскости и лучом зрения.

Из рис. 3 следует, что $\cos \varphi = d/D$. Поэтому

$$S \approx \frac{2\Delta D^2}{d} \approx \frac{2\Delta Z^2}{d} = \frac{2\Delta d}{(N_x \Delta_x X_0 + N_y \Delta_y Y_0 + N_z)^2}.$$

Возникающая при этом погрешность, которая максимальна на углах экрана, равна

$$\xi = (\operatorname{tg}^2(\alpha_{\max}/2) + \operatorname{tg}^2(\beta_{\max}/2)) 100 \%.$$

Для $\alpha_{\max} = 40^\circ$ и $\beta_{\max} = 30^\circ$ имеем $\xi \approx 20 \%$.

Выборка из текстурных карт. Обычно для определения точечной выборки из текстурной карты используется билинейная интерполяция по четырем точкам. Пусть текстурные координаты точки выборки равны (u, v) ; γ и θ — дробные части u и v , а $\{u\}$, $\{v\}$ — их целые части. Тогда определен квадрат на текстурной карте (рис. 4). Здесь R_1, R_2, R_3, R_4 — значения текстурного параметра в узлах квадрата. Значение текстурного

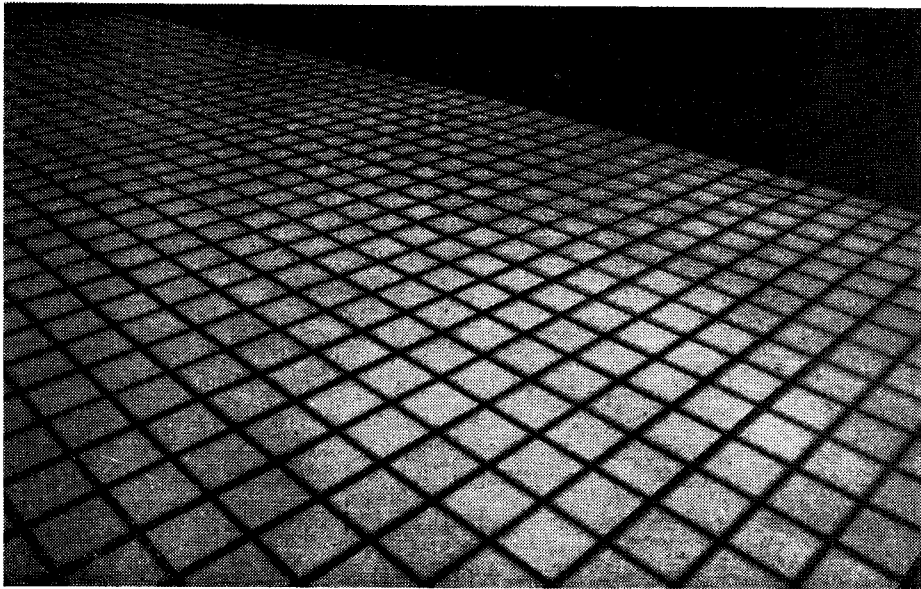


Рис. 6

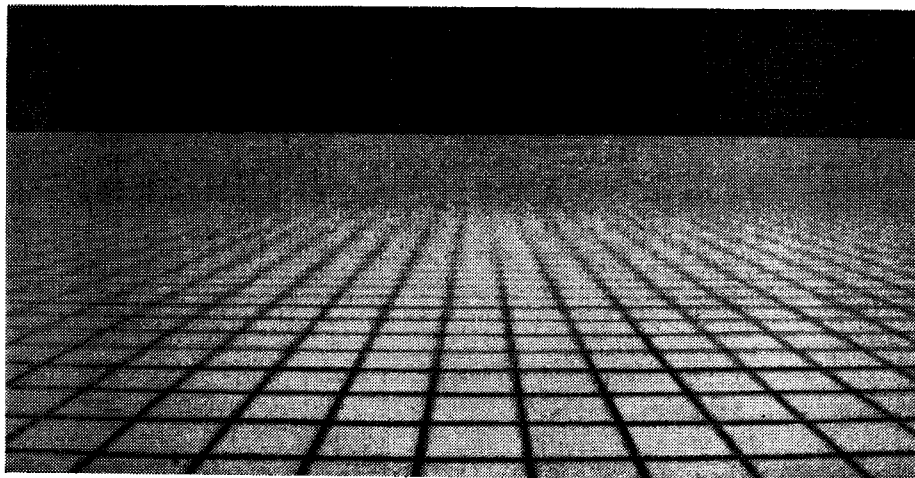


Рис. 7

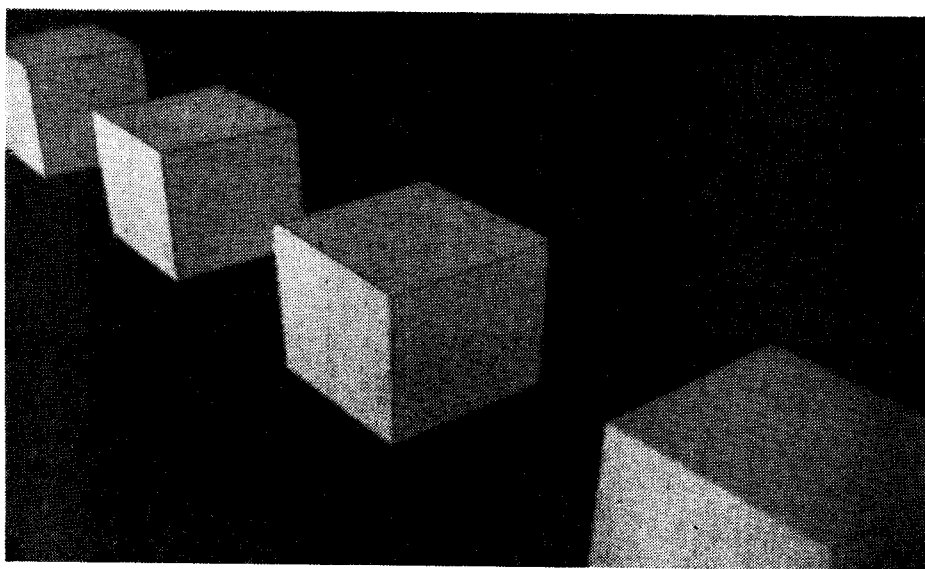


Рис. 8

параметра R в точке u, v вычисляется по формуле

$$R = \gamma(\Theta R_3 + (1 - \Theta)R_2) + (1 - \gamma)(\Theta R_4 + (1 - \Theta)R_1).$$

Нами предлагается метод интерполяции по трем точкам. Разобьем текстурный квадрат на два треугольника (рис. 5). Тогда при $\Theta \geq \gamma$ будем проводить билинейную интерполяцию между точками R_1, R_3, R_4 , а при $\Theta < \gamma$ — между точками R_1, R_2, R_3 . Рассмотрим эти случаи:

1) при $\Theta \geq \gamma$

$$R = \gamma R_3 + (\Theta - \gamma)R_4 + (1 - \Theta)R_1;$$

2) при $\Theta < \gamma$

$$R = \Theta R_3 + (\gamma - \Theta)R_2 + (1 - \gamma)R_1.$$

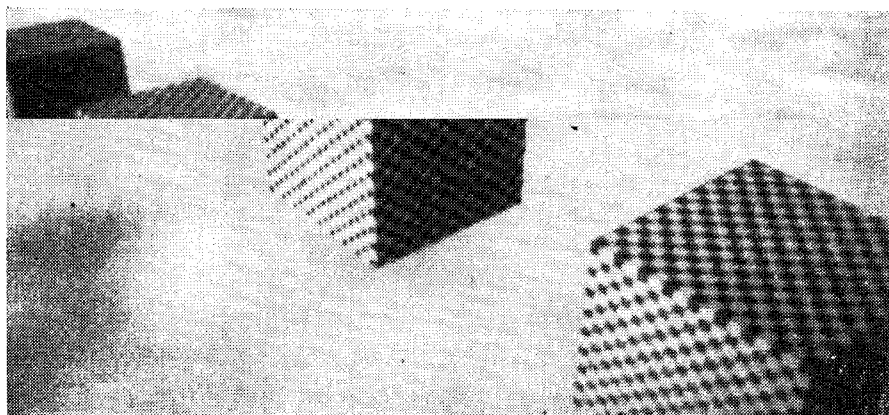


Рис. 9

Трилинейная интерполяция в пирамиде с интерполяцией внутри текстурной карты по трем точкам требует шести обращений к памяти, пяти умножений и десяти сложений. Трилинейная интерполяция с интерполяцией внутри текстурной карты по четырем точкам требует восьми обращений к памяти, семи умножений и четырнадцати сложений. Таким образом, в предлагаемом способе достигается некоторая экономия.

Заключение. Способ, изложенный в статье, был реализован на ЭВМ «Электроника 79». Рис. 6—9 иллюстрируют полученные результаты. Хорошее качество изображения метод дает на поверхностях, которые видны под большим углом зрения (см. рис. 6). На протяженных поверхностях, рассматриваемых под малым углом зрения (см. рис. 7), по мере удаления от наблюдателя возникает значительный смаз изображения как следствие увеличения ошибки аппроксимации эллипса кругом. Устранение этого эффекта будет предметом дальнейших исследований. На рис. 8 и 9 показано, насколько наличие текстуры на поверхности увеличивает визуальную сложность изображения. Представленная сцена содержит всего тринадцать граней, на которые отображены два типа текстуры: случайная для фона и квадраты для граней кубов.

Предложенный способ отображения текстуры пригоден для аппаратной реализации и может быть использован в многопроцессорных синтезирующих системах визуализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Heebert P. S. Survey of texture mapping // IEEE Comput. Graph. and Applicat.— 1986.— V. 6, N 11.
2. Blinn J., Newell M. Texture and reflection in computer generated images // Commun ACM.— 1976.— V. 19, N 10.
3. Dungan W., Stenger A., Suttly G. Texture tile consideration for raster graphics // Comput. Graph.— 1978.— V. 12, N 3.
4. Williams L. Pyramidal parametrics // Ibid.— 1983.— V. 17, N 3.

Поступила в редакцию 27 октября 1987 г.