

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

УДК 681.3.06

Б. С. Мазурок, А. Ф. Рожков, Ю. А. Сальников, Ю. Э. Тиссен, П. И. Унру
(Новосибирск)

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ЭФФЕКТОВ В СИСТЕМАХ «АЛЬБАТРОС»

Рассматриваются принципы генерации текстурированных поверхностей в компьютерных системах визуализации «Альбатрос». Описываются также некоторые особенности аппаратной реализации в видеопроцессоре алгоритмов генерации текстуры и таких специализированных эффектов, как интерполяция интенсивности, туман и прозрачность. Особое внимание уделено текстурному анти-зайлингу и вопросам точности вычислений.

Введение. С целью повышения реализма отображаемых сцен в одной из модификаций семейства «Альбатрос», которая называется «Альбатрос-Т», в составе видеопроцессора были разработаны аппаратные средства, позволяющие отображать текстурированные поверхности. Специальное оборудование дает возможность, как и в предыдущей модели, имитировать криволинейные поверхности путем интерполяции интенсивности, атмосферные явления типа дымки и тумана и такие свойства объектов, как прозрачность и отражательная способность. Генерация текстурированных поверхностей и интерполяция интенсивности основаны на использовании коэффициентов линейных функций, задающих распределения интенсивности и текстурных координат на грани.

В работе [2] показано, что значение интенсивности или текстурных координат на грани в экранном пространстве вычисляется согласно общему выражению для дробно-линейной функции:

$$\frac{AX_3 + BY_3 + C}{A_2X_3 + B_2Y_3 + C_2},$$

где коэффициенты A, B, C, A_2, B_2, C_2 поступают из геометрического процессора (ГП). Вычисление этого выражения для каждого пиксела видимой части грани осуществляется аппаратно в ВП. Получаемые по ходу вычислений значения Z -координаты

$$1/Z = A_2X_3 + B_2Y_3 + C_2$$

используются также для вычисления цвета с учетом тумана [3].

В данной статье рассматриваются принципы генерации текстурированных поверхностей, а также основные особенности специализированных аппаратных средств ВП для имитации текстуры и специализированных эффектов.

Генерация текстурированных поверхностей. В системах «Альбатрос» используется традиционный в машинной графике метод текстурирования поверхностей. В этом методе с текстурируемой гранью связывается 2-мерная система координат (u, v) и текстурная карта. В ВП на первом этапе по координатам пиксела, накрытого гранью, и параметрам, переданным из геометрического процессора, вычисляются координаты u, v проекции центра

пиксела на плоскость грани в текстурной системе координат. На втором этапе из памяти текстурной карты считывается модулируемый параметр (или параметры) для пиксела и выполняются антизлайзинговые вычисления.

Первый этап является 2-мерным проективным преобразованием, которое осуществляется дробно-линейными функциями общего вида аналогично вычислениям при интерполяции интенсивности. Коэффициенты функций, зависящие от положения наблюдателя и ориентации текстурной системы координат грани, вычисляются в геометрическом процессоре. Исходными параметрами в базе данных геометрического процессора для текстурированной грани являются коэффициенты линейных функций от 3-мерных координат, задающих распределение текстурных координат $u-v$ на грани в объектной (или мировой) системе координат. К специфически текстурным параметрам грани в базе данных относятся также номер текстурной карты, размер периода текстуры и номера двух цветов. Текстура карта содержит параметры модуляции между двумя выбранными для грани цветами. Окончательный параметр модуляции получается в результате антизлайзинговых вычислений как интерполяция между выборками памяти текстурных карт различной степени детальности.

Пусть плоскость текстурируемой грани задана уравнением

$$(N * R) + D = 0.$$

Пусть далее точка $P_0\{X_p, Y_p, Z_p\}$ плоскости имеет текстурные координаты (u_0, v_0) . Эта опорная точка может совпадать с одной из вершин грани или находиться внутри нее. Направление осей координат текстурной системы задает пара единичных векторов, лежащих в плоскости грани: $U\{U_x, U_y, U_z\}$ и $V\{V_x, V_y, V_z\}$. Для простоты будем считать текстурную систему координат ортогональной. Совокупность условий, налагаемых на векторы U и V , выражена в формулах

$$[U \times V] = N, \quad (U * V) = 0, \quad |U| = 1, \quad |V| = 1,$$

где $[\times]$ и $(*)$ — знаки векторного и скалярного произведений. Кроме опорной точки и направляющих векторов вдоль осей координат, необходимо задать действительные размеры периода текстуры на плоскости многоугольника — $L \times L$. Здесь также для простоты считаем линейные размеры периода текстуры по u - и v -координатам одинаковыми. В общем случае направляющие векторы U и V могут быть не перпендикулярными, а размеры периода текстуры по u - и v -координатам различными, что увеличивает разнообразие текстурных рисунков. Текстурные координаты произвольной точки плоскости грани $R\{X, Y, Z\}$ в принятых предположениях могут быть вычислены по формулам

$$\begin{aligned} u &= u_0 + ((R - P_0) * U)(1/L), \\ v &= v_0 + ((R - P_0) * V)(1/L). \end{aligned} \tag{1}$$

Такое масштабирование текстурных координат соответствует их интерпретации в видеопроекторе, где адресом текстурной карты являются дробные части значений вычисленных координат u и v точки грани.

Выражения (1) можно рассматривать как линейные функции от пространственных координат X, Y, Z , задающие распределение текстурных координат по площади грани:

$$\begin{aligned} u &= A_u X + B_u Y + C_u Z + D_u, \\ v &= A_v X + B_v Y + C_v Z + D_v, \end{aligned} \tag{2}$$

где

$$\begin{aligned} A_u &= U_x/L, & A_v &= V_x/L, \\ B_u &= U_y/L, & B_v &= V_y/L, \\ C_u &= U_z/L, & C_v &= V_z/L, \\ D_u &= u_0 - (P_0 * U)/L, & D_v &= v_0 - (P_0 * V)/L. \end{aligned}$$

Коэффициенты этих функций используются для представления текстурной системы координат грани в базе данных ГП. Текстуры коэффициенты заданы в базе данных в объектной (или мировой) системе координат. При преобразовании координат в систему наблюдателя текстурные коэффициенты преобразуются аналогично интерполяционным коэффициентам и коэффициентам уравнения плоскости. Периодический характер текстуры означает, что функции (2) и функции

$$u = A_u X + B_u Y + C_u Z + D_u + M, \quad v = A_v X + B_v Y + C_v Z + D_v + N,$$

где M и N — целые числа, описывают одну картину. Добавление (или вычитание) целых чисел к коэффициентам D эквивалентно параллельному переносу текстурной системы координат на целое число периодов текстуры. При этом для точности вычислений текстурных координат u и v в ВП предпочтительнее оказывается выбирать начало координат текстурной системы (точка $u = 0, v = 0$) в точках плоскости грани, близких к наблюдателю.

Неформальное объяснение такого выбора начала координат состоит в том, что абсолютная погрешность координат u и v возрастает с увеличением этих координат, так как для их вычисления и представления используется в ВП формат с плавающей запятой (12 разрядов мантиссы). Если начало текстурной системы координат выбрать в точке плоскости грани, близкой к наблюдателю (т. е. к началу системы координат наблюдателя), то, по крайней мере, на близких от наблюдателя расстояниях координаты u и v не будут большими. С другой стороны, при большем удалении от наблюдателя выборка значений текстуры происходит из карт все меньшей детальности, где требуется все меньшая точность текстурных координат для адресации памяти текстуры.

Перенос текстурной системы координат осуществляется после преобразования в систему координат наблюдателя путем вычисления дробной части коэффициентов D . Функции распределения текстурных координат в сдвинутой к наблюдателю текстурной системе имеют вид

$$\begin{aligned} u &= A'_u X_n + B'_u Y_n + C'_u Z_n + D'_u - [D'_u], \\ v &= A'_v X_n + B'_v Y_n + C'_v Z_n + D'_v - [D'_v], \end{aligned}$$

где штрихи означают, что коэффициенты преобразованы в систему координат наблюдателя; $[D'_u]$, $[D'_v]$ — целые части коэффициентов D .

Последним этапом геометрических преобразований текстурных коэффициентов является переход от четверок пространственных к тройкам экранных коэффициентов. После перспективного преобразования получаем формулы для вычисления текстурных координат в видеопроцессоре:

$$\begin{aligned} u &= \frac{A'_u X_3 + B'_u Y_3 + C'_u}{A_2 X_3 + B_2 Y_3 + C_2} + D'_u - [D'_u] = \frac{A_{u3} X_3 + B_{u3} Y_3 + C_{u3}}{A_2 X_3 + B_2 Y_3 + C_2}, \\ v &= \frac{A'_v X_3 + B'_v Y_3 + C'_v}{A_2 X_3 + B_2 Y_3 + C_2} + D'_v - [D'_v] = \frac{A_{v3} X_3 + B_{v3} Y_3 + C_{v3}}{A_2 X_3 + B_2 Y_3 + C_2}, \end{aligned}$$

где тройки коэффициентов вычисляются в ГП по формулам

$$A_{u3} = A'_u + A_2(D'_u - [D'_u]), \quad A_{v3} = A'_v + A_2(D'_v - [D'_v]),$$

$$B_{uo} = B'_u + B_2(D'_u - \{D'_u\}), \quad B_{vo} = B'_v + B_2(D'_v - \{D'_v\}),$$

$$C_{uo} = C'_u + C_2(D'_u - \{D'_u\}), \quad C_{vo} = C'_v + C_2(D'_v - \{D'_v\}).$$

После форматирования коэффициенты передаются в ВП.

Параллельный перенос текстурной системы координат является необходимым лишь в случае, если текстурированная грань включает большое число периодов текстуры. В противном случае вместо дробной части можно использовать сам коэффициент D .

Антиэлайзинг при обработке текстурированных граней. При перспективном проецировании текстурированной грани на плоскость экрана важной задачей является преодоление явлений элайзинга — дефектов изображения, связанных с необходимостью его воспроизведения при помощи дискретного растра. При отображении текстурных рисунков возможно появление подобных дефектов двойного рода. Во-первых, если размер проекции пиксела на текстурированную поверхность заметно меньше размеров тексела (элемента текстурного рисунка), при отсутствии средств антиэлайзинга на изображении будут присутствовать ступенчатые границы текселов. Во-вторых, если размер проекции пиксела будет превышать размер тексела, это приведет к выпадению отдельных частей текстурного рисунка и серьезному искажению изображения. В [4] отмечено, что для систем реального времени традиционно применяется метод предварительной фильтрации текстуры, т. е. предварительная обработка в нереальном времени исходного текстурного образца. Здесь существует целый ряд методов [5], среди которых можно выделить два основных подхода: использование пирамиды копий текстурного рисунка с различными уровнями детализации (точечная выборка, трилинейная интерполяция, «четырёхмерная» пирамида, эллиптическое взвешенное усреднение) и таблиц суммарной площади.

Все эти методы требуют различного объема вычислений и позволяют получить изображения различного качества. Так, метод точечной выборки с использованием пирамиды прост, но дает резкие переходы при смене уровня детализации и не устраняет ступенчатых границ текселов. Использование трилинейной интерполяции позволяет устранить все виды элайзинга, но приводит к тому, что смена уровня детальности на более грубый может произойти слишком рано; в результате теряются мелкие детали рисунка и при острых углах наблюдения значительная область, прилежащая к горизонту, получает равномерную (лишенную рисунка) окраску. Это связано с тем, что в данном методе проекция пиксела на плоскость грани аппроксимируется квадратом (либо кругом). При использовании «четырёхмерной» пирамиды проекция пиксела аппроксимируется прямоугольником, что позволяет отодвинуть границу «смаза» изображения при определенных ориентациях текстурной системы координат относительно растра экрана. Метод эллиптического взвешенного усреднения позволяет получить наилучшее качество изображения, так как аппроксимация проекции пиксела эллипсом позволяет учесть не только ее размеры и эксцентриситет, но и ориентацию. Однако объем памяти и вычисления, необходимые для реализации двух последних методов, возрастают в несколько раз по сравнению с методом трилинейной интерполяции. Метод таблиц суммарной площади по качеству изображения и требуемым затратам сравним с методом «четырёхмерной» пирамиды. В связи с необходимостью обеспечить приемлемое качество изображения при минимальных затратах оборудования был выбран алгоритм трилинейной интерполяции с использованием пирамиды уровней детализации. Суть метода состоит в следующем.

Допустим, имеется исходный текстурный образец, представляющий собой текстурную карту из $2^n \times 2^n$ текселов. Пирамида формируется как последовательность карт из

$$2^{n-1} \times 2^{n-1}, \quad 2^{n-2} \times 2^{n-2}, \quad \dots, \quad 2^0 \times 2^0$$

текселов. Каждая последующая карта формируется из предыдущей усреднением с помощью фильтра. При отображении текстурированной грани первая задача состоит в правильном выборе уровня детальности. Критерием этого выбора является вычисляемый в ВП размер центральной проекции пиксела на текстурированную грань. Для обеспечения плавного перехода рисунка с одной детальностью в рисунок с другой детальностью в каждом пикселе грани производится одновременная выборка значений текстурной модуляции T' , T'' из двух соседних уровней детализации и линейная интерполяция между этими значениями:

$$T = K_r T' + (1 - K_r) T''.$$

Весовой коэффициент K_r линейной интерполяции определяется размером проекции пиксела на текстурированную грань.

Значения T' и T'' вычисляются с помощью билинейной интерполяции между четырьмя значениями: T_1, T_2, T_3, T_4 , выбранными из памяти текстурных карт соответствующего уровня детальности. Эти четыре значения являются параметрами текстурной модуляции в четырех соседних текселах карты, ближайших к проекции центра пиксела на текстурированную грань. Центр проекции пиксела находится в прямоугольнике, в вершинах которого расположены центры четырех текселов, а значение текстурной модуляции в пикселе лежит между $\min(T_1, T_2, T_3, T_4)$ и $\max(T_1, T_2, T_3, T_4)$:

$$T' = (1 - K_u)((1 - K_v)T_1 + K_v T_2) + K_u((1 - K_v)T_3 + K_v T_4) \quad (3)$$

(аналогично T'').

Коэффициенты билинейной интерполяции K_u, K_v определяются значениями текстурных координат U и V , а также выбранным уровнем детальности. Вычисленное значение T используется затем как коэффициент взвешивания между двумя цветами, формирующими рисунок текстурированной грани. Размер проекции пиксела на плоскость грани вычисляется по формуле

$$S = 2\Delta Z_n^2 / |D_n|,$$

где Δ — размер пиксела; Z_n — Z -координата отображаемой точки грани (вычисляется в ВП); $|D_n|$ — модуль расстояния до плоскости грани. Для удобства вычислений из ГП передается параметр:

$$PAR = (1/L)(1/D_n).$$

В ВП вычисляется, таким образом, «нормированный» размер «пятна»:

$$S/L = 2\Delta Z^2 PAR.$$

Хотя величина $1/L$ неявно присутствует уже в текстурных коэффициентах:

$$1/L = \sqrt{(A_u^2 + B_u^2 + C_u^2)},$$

удобно тем не менее иметь эту величину в описании многоугольника (в базе данных ГП). Внося в описание многоугольника вместо величины $1/L$ другие значения, можно подбирать момент смены уровня детализации индивидуально для каждой грани.

Блок текстуры в системах «Альбатрос». В ГП при задании и преобразовании коэффициентов используется 32-разрядный формат с плавающей запятой. Тем не менее в ВП при вычислении разрядность троек коэффициентов $\{A, B, C\}$ может быть снижена путем приведения троек коэффициентов к так называемому формату с общим порядком. Пусть тройка $\{A, B, C\}$ задана в

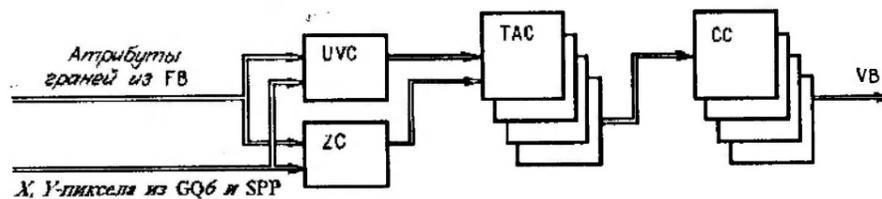


Рис. 1

плавающим формате:

$$A = M_a 2^{p_a}, \quad B = M_b 2^{p_b}, \quad C = M_c 2^{p_c},$$

где M_a, M_b, M_c — мантиссы, а p_a, p_b, p_c — порядки коэффициентов. Обозначим через p максимальный порядок тройки коэффициентов:

$$p = \max(p_a, p_b, p_c).$$

Каждую мантиссу сдвинем влево на число разрядов, равное разности между максимальным порядком и порядком соответствующего коэффициента, и введем обозначение для полученной тройки:

$$A' = A 2^{-(p-p_a)}, \quad B' = B 2^{-(p-p_b)}, \quad C' = C 2^{-(p-p_c)}.$$

Переход к новому формату представления коэффициентов может быть записан в виде тождественного равенства:

$$\{A, B, C\} = \{A', B', C'\} \times 2^p.$$

При этом в двоичном представлении хотя бы в одном из чисел A', B', C' в старшем разряде останется «1», что ограничивает область изменения модуля вектора $M = \{A', B', C'\}$:

$$0,5 \leq |M| \leq (1 - 2^{-n})\sqrt{3},$$

где принято, что запятая стоит перед старшим разрядом и в каждой компоненте оставлено после округления n разрядов.

На рис. 1 представлена блок-схема части ВП, на которой выполняются вычисления, связанные с генерацией текстурных граней, тумана и интерполяцией. Коды коэффициентов A', B', C' поступают из памяти кадра (FB), координаты пикселя — из последнего в конвейере клеточного процессора (GQ6) и субпиксельного процессора (SPP) (см. [1]).

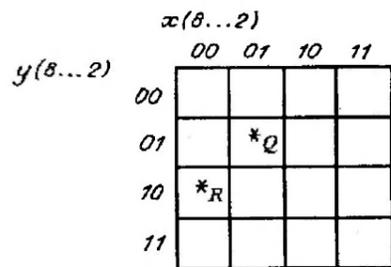


Рис. 2

В вычислителях координат UVC и ZC определяются значения функций $f(x, y) = A'x + B'y + C'$ для U, V, Z соответственно, причем в каждом такте параллельно обрабатываются четыре пикселя. Очевидно, что при этом для определения каждой координаты необходимо 8 умножителей и 8 сумматоров. Однако число умножителей можно сократить, воспользовавшись однажды вычисленным значением функций $f(Q)$ в точке Q (рис. 2).

В общем виде выражение для вычисления в каждой точке можно записать так:

$$f(x, y) = f(Q) + A'dx + B'dy,$$

где (x, y) — координаты точки (одного пиксела из 16);

$$dx = -1, 0, 1, 2; \quad dy = -1, 0, 1, 2.$$

Например, для точки R $f(R) = f(A) - A' + B'$.

Каждый из вычислителей текстурного адреса (ТАС) и вычислителей цвета (СС) обрабатывает один пиксел за один такт, поэтому для параллельной обработки четырех пикселов в одном такте используются четыре модуля ТАС и СС (см. блок-схему на рис. 1).

В ТАС осуществляется умножение на координату Z , вычисление параметра $\exp(Z_n/Z_0)$ для тумана и, собственно, определение адреса текстурной карты и коэффициентов трилинейной интерполяции. Координата Z находится при помощи таблицы обратных значений $(1/(A_2x + B_2y + C_2))$.

В СС производится выборка из памяти текстурных карт восьми значений текстурных модуляций (по четыре для двух уровней детализации) и трилинейная интерполяция. Приведением формул (3) билинейной интерполяции к виду

$$T' = T_1 + K_u(T_2 - T_1) + K_v(T_3 - T_1) + K_uK_v(T_4 - T_2 - T_3 + T_4)$$

(аналогично для T'')

можно значительно снизить объем оборудования, но при этом в памяти текстурных карт для каждого уровня детализации должны храниться значения выражений: $T_1, T_2 - T_1, T_3 - T_1, T_4 - T_2 - T_3 - T_4$.

В видеобуфер (VB) поступают коды цвета $C = \{R, G, B\}$ как результат взвешивания между двумя цветами (C_1 и C_2), формирующими рисунок текстурированной грани:

$$C = C_1T + C_2(1 - T),$$

здесь T — значение текстурного параметра, полученное после трилинейной интерполяции.

Прозрачность объектов. Имитация прозрачных объектов стандартными способами описана в [6]. В системах «Альбатрос» используется упрощенный метод, основанный на разряжении субпиксельной маски и позволяющий получить желаемый визуальный эффект.

Каждая грань прозрачного объекта сопровождается 6-разрядным кодом, определяющим степень прозрачности. В зависимости от этого кода уменьшается число занятых субпикселов, и, следовательно, не все субпикселы, занятые многоугольником, отмечаются в памяти масок как занятые. Это дает возможность при обработке многоугольника, расположенного под прозрачной гранью, сформировать площадь видимой части из числа еще не замаскированных субпикселов. На рис. 3 приведены два примера с прозрачными гранями в пикселе.

Знаком «*» обозначены субпикселы, занятые прозрачной гранью, а буквой «Ф» — субпикселы от фоновой грани, видимой сквозь прозрачную. На рис. 3, а степень прозрачности 0,5, а на рис. 3, б — 0,25.

Вычисление тумана (дымки). Как отмечалось, для получения эффекта тумана на изображении используется значение Z -координаты, найденное в ходе вычисления дроб-

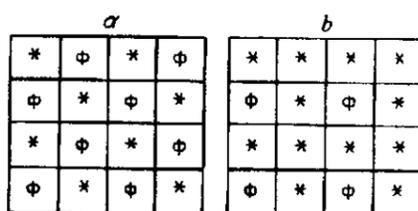


Рис. 3

но-линейного выражения как меры удаленности объекта от наблюдателя. Полученное приближенное значение дальности точки грани от наблюдателя (Z_n) участвует в вычислении выражения для цвета пиксела с учетом тумана:

$$C = C_0 \exp(Z_n/Z_0) + C_T(1 - \exp(Z_n/Z_0)),$$

где C_0 — текущее значение цвета (R, G, B) грани; C_T — значение цвета (R, G, B) тумана; Z_0 — значение дальности видимости. Для хранения кодов C_T и Z_0 используются регистры, загружаемые из управляющей ЭВМ через тестовую шину системы. Изменением дальности видимости можно имитировать различные плотности тумана. Из последней формулы видно, что если Z_n стремится к 0, то $C = C_0$, и, напротив, если Z_n стремится к бесконечности, то $C = C_T$.

Заключение. Генерация специализированных эффектов в компьютерных системах визуализации является мощным средством повышения реализма изображений. В модифицированном варианте системы («Альбатрос-Т») впервые в отечественной практике была аппаратно реализована генерация текстурных поверхностей в реальном времени и продемонстрировано ее значение в повышении реализма изображений.

Известные методы генерации специализированных эффектов в системе «Альбатрос» дополнены предложенными авторами алгоритмами и аппаратными решениями, позволившими существенно повысить качество изображений при минимальных затратах на оборудование, среди которых наибольшее значение имеют следующие:

- представление текстурной системы координат грани коэффициентами линейных функций от пространственных координат;
- сдвиг текстурной системы координат на целое число периодов (операция выполняется в геометрическом процессоре и позволяет использовать для вычисления текстурных координат то же оборудование в видеопроцессоре, что и для интерполяции интенсивности);
- хранение в памяти текстуры одного параметра вместо полного трехкомпонентного цвета (этот параметр интерпретируется как коэффициент взвешивания между двумя цветами, описывающими грань, и включается в антиэлайзинговые вычисления);
- эффективный способ вычисления линейных функций от экранных координат пиксела в видеопроцессоре (способ позволяет вычислять линейную функцию 1 раз на клетку 4×4 пиксела);
- использование разряженной субпиксельной маски для имитации эффекта полупрозрачности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асмус А. Э., Богомяков А. И., Вяткин С. И. и др. Видеопроцессор компьютерной системы визуализации «Альбатрос» // Автометрия.—1994.—№ 6.
2. Долговесов Б. С., Мазурок Б. С., Маслобоев Ю. В., Рожков А. Ф. Геометрические преобразования в семействе «Альбатрос» // Там же.
3. Богданов В. В., Ковалев А. М., Нефедов И. Б. и др. Канал видеопреобразования синтезирующей системы визуализации // Автометрия.—1986.—№ 4.
4. Ковалев А. М., Тарасов Ю. В. Текстура на произвольно ориентированных плоских поверхностях // Автометрия.—1988.—№ 6.
5. Necht P.S. Survey of texture mapping // IEEE Comput. Graph. and Applicat.—1986.—6, N 11.
6. Фоли Дж., Ван Дэм А. Основы интерактивной машинной графики.—М.: Мир, 1985.—Т. 2.

Поступила в редакцию 17 июня 1994 г.