

А. В. КУЖУТОВ, В. А. ЛЕУС, Н. С. ПОЛЕЩУК
(Новосибирск)

ЧИСЛЕННЫЙ СИНТЕЗ ТОНОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОСВЕЩЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ И РАСТРОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Физический процесс оптического изображения 3-мерных тел, поверхности которых рассеивают падающий свет, моделируется на электронно-вычислительных устройствах [1]. Поверхность заменяют многогранником, вычисляют освещенность каждой грани в зависимости от ориентации и расстояния до источника света, проецируют грани на картинную плоскость и учитывают их взаимное закрытие. Вычисленная матрица яркостей управляет интенсивностью электронного луча при выводе изображения на ЭЛТ.

В данной работе предлагается методика численного синтеза тоновых изображений, использующая дискретную модель поверхности. Описывается система отображения растрового типа, разработанная и созданная в Институте математики СО АН СССР. По предложению А. В. Федотова в системе предусмотрена возможность регистрации моделей динамических процессов в форме магнитной видеозаписи.

Дискретная модель поверхности. Совокупность 3-мерных тел, определенным образом расположенных в системе декартовых координат (X, Y, Z) , называется объектом. В памяти ЭВМ объекту соответствует массив данных. В нем принята иерархическая структура, чтобы передать степени свободы или связанности тел при перемещениях. Объект делится на предметы в координатах (x, y, z) , предметы, в свою очередь, делятся на детали в координатах (ξ, η, ζ) и т. д. Координатные системы связаны между собой матрицами перехода B_1, B_2, \dots, B_J . Количество уровней J зависит от того, сколько кинематически соподчиненных ступеней следует выделить. На самом низком уровне каждой цепи в этой иерархии находится численная модель поверхности, физическим прообразом которой является непрозрачная твердая оболочка.

Универсальной информационной единицей численной модели является ДЭП — дискретный элемент поверхности. В нашем случае ДЭП содержит: ξ, η, ζ — координаты точки на поверхности; λ, μ, ν — координаты единичного вектора нормали; $a_{(+1)}$ и $a_{(-1)}$ — коэффициенты, характеризующие отражательную способность сторон поверхности.

ДЭПы вычисляются с любой степенью дискретности на основании минимального исходного задания поверхности каркасом. Каркас есть конечная совокупность координатных линий $\{u_i, v_j\}$ криволинейных координат на поверхности. Выбирая на каркасных кривых подходящие последовательности точек и используя их в качестве узлов интерполяции, можно получить приближенные точки поверхности и нормали в них. В работе [2] показана зависимость погрешности подобной аппроксимации от кривизны поверхности и диаметра каркасных ячеек.

Синтез изображения. Для получения перспективного изображения объекта задаются: F — центр проецирования, v — вектор осевой линии пирамиды видимости, p — положение картинной плоскости, S — источник света, I — светимость источника, l — вектор осевой линии пирамиды освещения, q — положение световой плоскости, m_F и m_S — масштабные множители. Объект вместе с этими параметрами называется сценой, для которой выбирается удобная в вычислительном смысле система координат $(\mathcal{X}, \mathcal{Y}, \mathcal{Z})$ (рис. 1).

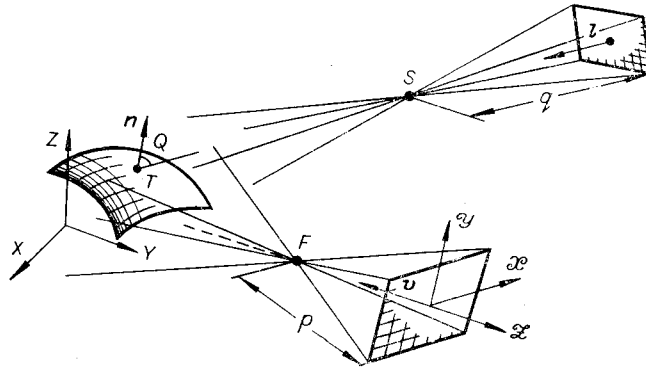


Рис. 1. Построение изображения объекта.

Задание поверхностей совокупностями ДЭПов определяет специфику алгоритмов затенения и удаления закрытых частей. Предлагаемые алгоритмы радикально отличаются от алгоритмов Робертса, Варнока и других зарубежных авторов [1].

Соответственно каждому растру будущего изображения в памяти вычислительной машины отводится массив ДЭК — дискретный элемент картины. Геометрически это распределение памяти эквивалентно разбиению пирамид видимости и освещения на элементарные телесные углы. В каждом ДЭКе резервированы места для трех величин: ρ_F , ρ_S и E .

Вычислительный процесс строится следующим образом. Перебираются ДЭПы объекта.

1. Если информация объекта исчерпана, происходит переход на пункт 4. В ином случае для очередного ДЭПа умножением на соответствующую матрицу $B = B_0 \times B_1 \times \dots \times B_r$ получают координаты текущей точки T и вектора нормали в системе сцены. На основании полученных координат точки определяются элементарные телесные углы в пирамидах видимости и освещения, содержащие данную точку, и вырабатываются адреса A_F и A_S соответствующих ДЭКов.

2. Если $|\vec{TF}| > \rho_F$, точка T не видна и осуществляется возврат на пункт 1. Если $|\vec{TF}| < \rho_F$, величина $|\vec{TF}|$ заносится на место ρ_F по адресу A_F .

3. Если $|\vec{TS}| > \rho_S$, точка T экранирована и по адресу A_F заносится минимальная освещенность E_0 . Если $|\vec{TS}| < \rho_S$, величина $|\vec{TS}|$ заносится на место ρ_S по адресу A_S и вычисляется косинус угла θ между нормалью и направлением на источник. Освещенность, подсчитанная согласно формуле

$$E = \frac{I \cos \theta}{|\vec{TS}|^2} a_{(\text{sign} \cos \theta)} + E_0,$$

заносится по адресу A_F . (Возврат к пункту 1.)

4. Начинается второй просмотр информации объекта.

5. Если объект исчерпан, алгоритм заканчивает работу. В противном случае для очередного ДЭПа проводятся вычисления 1-го пункта.

6. Если $|\vec{TS}| > \rho_S$, по адресу A_F заносится E_0 . Если $|\vec{TS}| < \rho_S$, производится возврат на пункт 5.

По окончании работы алгоритма находящиеся в ДЭКах значения E принимаются на элементы матрицы яркостей. Возможен и более сложный расчет яркостей, например с учетом заданной индикатрисы рассеяния или других оптических и психофизических тонкостей. Нетрудно моделировать освещение от нескольких источников или из «бес-

конечности». Однако все эти усовершенствования ни в коей мере не затрагивают сущности растрового алгоритма.

Идея растрового алгоритма была высказана в [2] в связи с получением штриховых изображений. Там же отмечалась линейная зависимость объема вычислений от N -информативности объекта. Позднее в работе [3] был проведен анализ эффективности различных подходов и сделан вывод не в пользу растрового алгоритма. Это заключение справедливо лишь для случая описания плоских или слабо искривленных поверхностей с многоугольными гранями. При описании объектов со сложным рельефом количество граней настолько возрастает, что становится сравнимым с числом дискретных элементов. В такой ситуации растровый алгоритм уже имеет преимущество. Как доказано в работе [2], растровый алгоритм обладает высоким показателем параллельности. На мультипроцессорном вычислителе он в принципе может дать исключительно слабую (порядка $\log N$) зависимость времени счета от информационной емкости данных.

Система отображения. Полученная алгоритмическим путем матрица яркостей хранится в памяти ЭВМ, и ее преобразование в кадр видимого тонового изображения, накопление кадров и тем более оперативное отображение полученного фильма представляет сложную техническую задачу. В настоящее время для этой цели используют устройства вывода на микрофильм, с помощью которых информация регистрируется на киноплёнку. Вслед за регистрацией неизбежна фотохимическая обработка пленки, что делает невозможным просмотр фильма сразу после его вывода из ЭВМ. Для оперативного отображения полученного с помощью ЭВМ фильма создана система, в которой изображения в процессе работы ЭВМ накапливаются на видеоманитоне в виде фильма и могут быть немедленно воспроизведены. Суть работы системы состоит в следующем. Цифровая информация преобразуется в аналоговую и фиксируется в промежуточной памяти. Затем следует преобразование в стандартный видеосигнал и запись на магнитную ленту видеоманитона, параллельно которой осуществляется контрольная визуализация. Оперативный просмотр записанного видеofilmа реализуется выводом на обычный телеприемник в кадровом или фильмовом режимах.

Структурная схема системы отображения приведена на рис. 2. Система состоит из следующих основных блоков: согласования с ЭВМ (интерфейса), промежуточной памяти, разверток записи, разверток чтения, видеозаписи. В структуре и конструкции системы учтены некоторые особенности решения практических задач моделирования динамики сложных объектов на ЭВМ. Исходным было требование обеспечения оперативного отображения синтезированного вычислительной машиной фильма с применением доступных технических средств.

Для этой цели нами использована телевизионная техника и телевизионные методы формирования изображения. Это, в свою очередь, влечет необходимость большого объема памяти для хранения изображения и ее высокого быстродействия. При дискретности раstra 160×128 точек с 32 различными уровнями яркости требуется память более 10^5 бит информации. Такая дискретность продиктована в нашем случае вычислительными возможностями, тогда как аппаратура рассчитана на большее — 640×512 точек раstra.

Можно выделить две особенности системы. Первая состоит в согласовании скорости вывода информации из вычислительной машины и скорости записи ее на магнитофоне. Для согласования использована запоминающая электронно-лучевая трубка (ЗЭЛТ) [4]. Перемещение электронного луча по рабочему полю мишени осуществлено фокусирующе-отклоняющей системой ФОС-108, на которую нагружены поочередно подключающиеся две пары X_3, Y_3 и X_4, Y_4 усилителей отклонения.

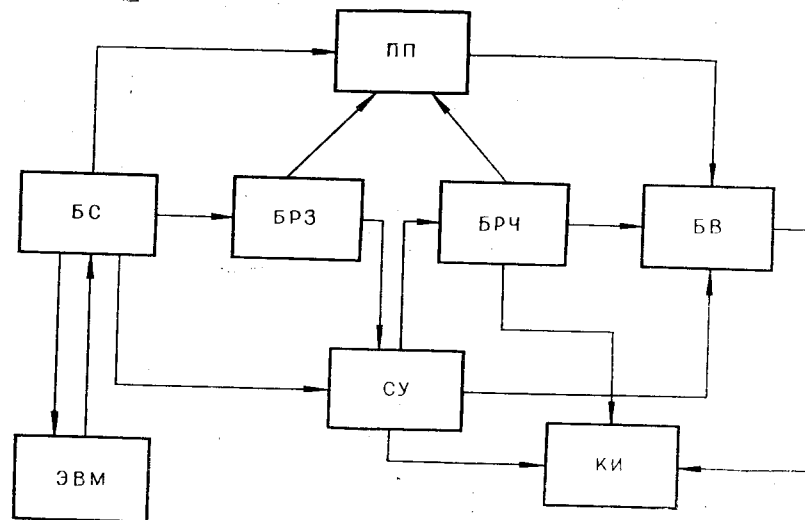


Рис. 2. Структурная схема системы отображения:

ПП — промежуточная память, БС — блок согласования, БРЗ — блок разверток записи, БРЧ — блок разверток чтения, БВ — блок видеозаписи, СУ — схема управления, КИ — контрольный индикатор.

Информация об изображении преобразуется в сигналы формирования раstra с помощью блока разверток записи. Последний вырабатывает пару синхронных X_c , Y_c линейно-меняющихся ступенчатых сигналов, которые поступают от цифроаналоговых преобразователей, управляемых счетчиками элементов и строк. Во время формирования изображения на мишени ЗЭЛТ обмен информацией блока согласования с вычислительной машиной происходит со скоростью, соответствующей пропускной способности устройства обмена машины. При обмене массив изображения из ЭВМ поступает семиразрядными кодами, из них пять разрядов управляют яркостью луча, шестой и седьмой используются для синхронизации строк и кадра соответственно. Изображение запоминается на мишени ЗЭЛТ в виде потенциального рельефа, сразу же после запоминания к отклоняющей системе подключается блок разверток чтения. Этот блок формирует на мишени ЗЭЛТ считывающий растр. Путем построчного сканирования мишени эквивалент изображения считывается с ЗЭЛТ в виде стандартного телевизионного видеосигнала и подается на видеоманитофон для записи, а также на контрольный индикатор.

Вторая особенность системы состоит в реализации в видеоманитофоне режима записи единичных кадров изображения. Сущность режима состоит в том, что в видеоманитофоне типа ВК-1/2 вмонтирован привод шагового протягивания ленты, содержащий ведущую ось и прижимной ролик. В качестве ведущей оси использован тонвал, соединенный с осью шагового двигателя. Согласование вращения блока головок с моментом записи изображения на ленте и ее протягиванием на шаг записи обеспечивает схема управления. На ее вход подается импульс «Конец кадра» с блока разверток записи, а с видеоманитофона — импульсы полей и кадров. При этом производится один цикл записи, за время которого на ленте записывается заданное число полукадров изображения 1—16. Кадровые импульсы в заданные моменты времени на определенные интервалы времени подключают усилитель к записывающей головке, а импульсы полей синхронизируют протягивание ленты на шаг записи.

Воспроизведение полученной видеозаписи осуществляется при непрерывном протягивании ленты. В качестве контрольного индикатора используется обычный телевизионный приемник.

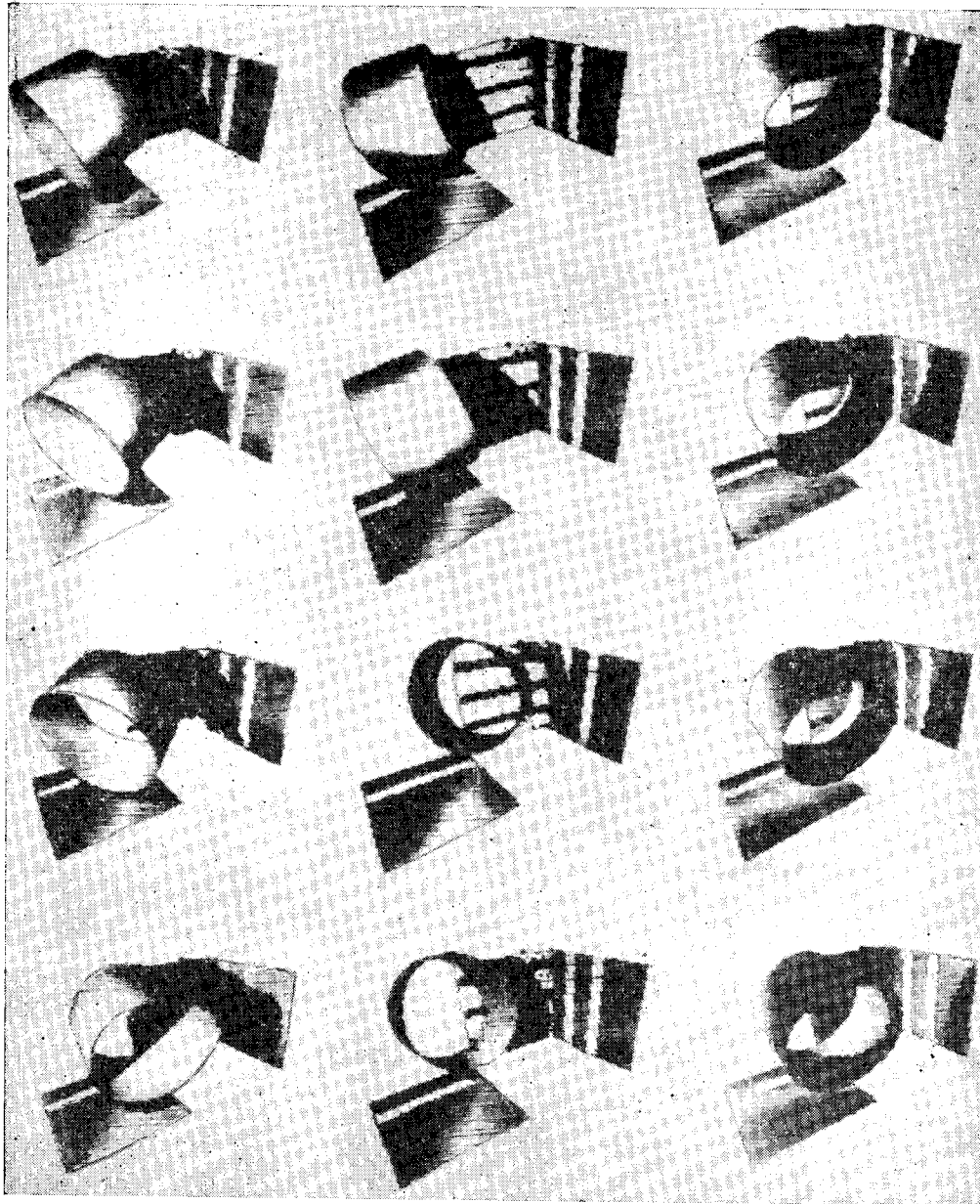


Рис. 3. Растровая кинограмма кинематического процесса.

Заключение. В реализации тонового изображения численной модели пространственного объекта отражено единство технической и алгоритмической сторон 3-мерной машинной графики. Данная работа объединила новый подход к численному синтезу изображений с компактной и недорогой системой визуализации. Визуальное отображение динамической модели — это многокадровый фильм, при получении которого все стороны испытываются на жизнеспособность и численный метод, и технические решения. На рис. 3 приведена кинограмма движения, которое моделировалось в ЭВМ и выводилось через систему отображения. Полученные результаты позволяют надеяться на достижение в будущем естественности изображений численных моделей. Наглядное

представление на телевизионном экране решений пространственных задач с успехом заменит труднообозримые колонки цифр и традиционные семейства графиков. Благодаря документированию видеозаписей динамических моделей появится возможность оперативно и многократно анализировать сложные процессы независимо от ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ньюмен У., Спрулл Р. Основы интерактивной машинной графики. М., «Мир», 1976.
2. Леус В. А. Перспективное изображение трехмерных непрозрачных объектов.— В кн.: Вычислительные системы. Вып. 50 Новосибирск, изд. ИМ СО АН СССР, 1972.
3. Sutherland Ivan E., Sproull Robert F., Schumacker Robert A. A characterization of ten hidden-surface algorithms.— "ACM Computing Surveys", 1974, vol. 6, N 1, p. 1—55.
4. Харчитян Р. С., Македонский В. Л. Запоминающие трубки с окисно-кремниевой мишенью.— «Техника кино и телевидения», 1975, № 12, с 44—48.

Поступила в редакцию 21 февраля 1978 г.
