

УДК 681.323

В.М. ГУСЯТИН, В.Н. СИДОРОВ

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУТИ СЛЕДОВАНИЯ ЛУЧА СВЕТА В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ОБЪЕКТЕ С ЦЕЛЬЮ СИНТЕЗА ЕГО ИЗОБРАЖЕНИЯ (ВОЛНОВАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА)

Предлагается метод определения пути следования луча света в газодинамическом объекте, опираясь на волновую теорию света. Определены шаг итерации и ширина светового потока, соответствующего одному проекционному лучу, которые позволяют оптимально сочетать аппаратные затраты и точность вычислений. Результаты метода могут быть использованы при разработке систем визуализации реального времени для авиационных и космических тренажеров.

газодинамический объект, коэффициент преломления света, волновая теория света, анизотропная среда, угловое разрешение системы визуализации, проекционный луч, система визуализации

Введение

При формировании изображения в системах визуализации (СВ) тренажеров транспортных средств значительное внимание уделяется отображению различных природных явлений. Визуализация явлений, в которых задействованы газодинамические объекты, необходима в тренажерах летательных аппаратов, так как значительно повышают реалистичность получаемого изображения и помогают приблизить режим обучения пилота на тренажере к реальности. Примерами таких природных явлений могут быть марево перегретого воздуха и турбулентная струя за соплом реактивного двигателя. В настоящее время отображение подобных объектов в СВ сводится к зрительной имитации [1 – 2].

В приведенной статье рассматривается один из способов определения пути следования луча света внутри газодинамического объекта (ГО). Этот метод основывается на волновой теории света [3]. Данный подход к визуализации ГО является физически точным, что позволяет использовать СВ не только для построения тренажеров, но и для визуализации газодинамических явлений в процессе их исследования [4 – 5].

Постановка задачи. На рис. 1 представлены ос-

новные геометрические элементы рассматриваемой задачи, принятые в [6]. Введены правая "земная" g -система координат (с/к) x, y, z , связанная с наблюдателем ν -система координат u, v, w , начало которой размещено в центре тяжести транспортного средства (самолета, машины и т.д.) и газодинамический объект (ГДО), его положение определено в с/к x', y', z' , центр которой O_1 совмещен с центром одного из оснований газодинамического объекта и задан относительно g -системы координатами $X_1 Y_1 Z_1$. Точка наблюдения h (центр проекции) задана относительно начала координат ν -системы радиус-вектором $\vec{h}(U_h, V_h, W_h)$. Экран (плоскость проекции) расположен перпендикулярно оси u так, что его центр O_ε в ν -системе в общем случае имеет координаты $(U_\varepsilon + U_h), V_\varepsilon, W_\varepsilon$. В плоскости экрана введена система координат $u_\varepsilon, z_\varepsilon$ с началом в центре экрана. Показан вектор наблюдения \vec{v} , идущий от точки наблюдения h до центра текущего пиксела экрана. Точки пересечения проекционного луча (ПЛ) с ГО определяются в соответствии с работой [6] путем итерационного вычисления $\lambda \vec{v}$. На рис. 1 показаны точка входа P_1 проекционного луча в классификационную оболочку ГО и путь следования светового луча в газодинамическом объекте $P_1 P_3$.

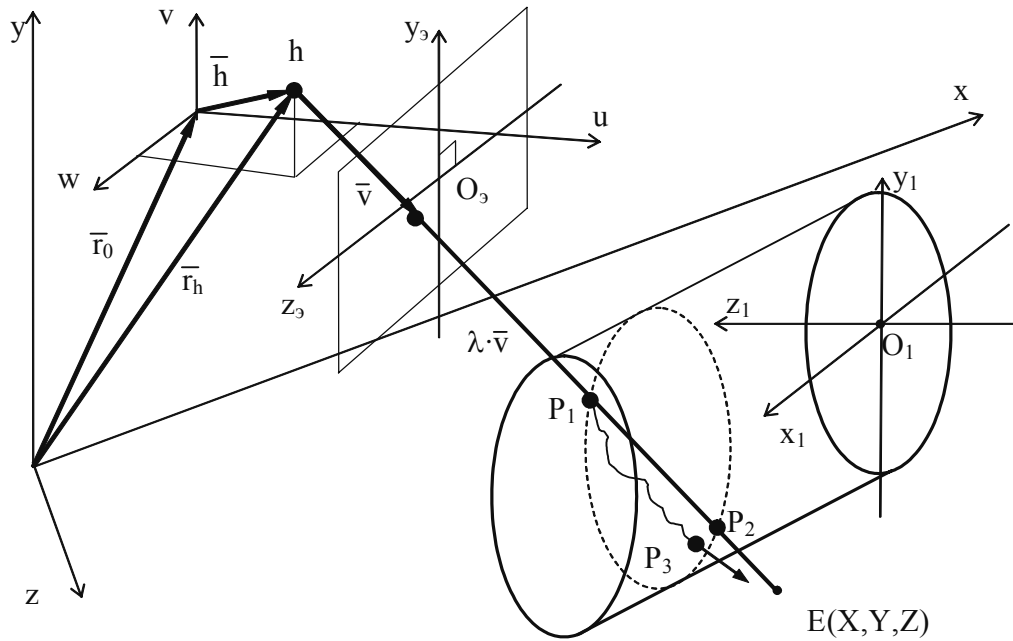


Рис. 1. Основные геометрические элементы задачи

Определение пути следования светового луча внутри газодинамического объекта

Так как газодинамический объект является анизотропной средой, следовательно, при прохождении через него луч света будет отклоняться от прямолинейного пути следования.

Предложенный в статье метод основывается на волновой теории распространения света, согласно которой входящий луч возбуждает колебания газодинамической среды [3]. Таким образом, направление распространения света в газодинамическом объекте может быть определено по изменению фронта волны, соответствующей этому лучу.

При рассмотрении предложенного метода для простоты изложения воспользуемся его двумерной интерпретацией.

Световой поток, соответствующий одному пикселу, изображения состоит из множества лучей, расположенных между лучами $\bar{a}1$ и $\bar{a}2$. На входе в газодинамический объект в точках P3, P4 этим лучам соответствуют лучи $\bar{a}11$ и $\bar{a}12$. Так как траектория распространения света от точки P3 до точки P1 в соответствии с законами геометрической оптики равнозначна траектории распространения

света в ГО от точки P1 до точки P3, то мы можем начинать итерационный процесс нахождения пути следования светового луча в ГО от точки P1.

Таким образом, путь следования светового луча будет соответствовать плавной кривой P1P3. Для вычислений на ЭВМ интегрирование по углу вдоль этой кривой заменяется суммированием вдоль ломаной P1B1B3B4P3. Причем длины сегментов этой ломаной равны между собой. Длина сегмента ломаной задает пространственный шаг процесса вычислений алгоритма определения пути следования света в газодинамическом объекте. Началом итерационных вычислений в соответствии с предложенным методом является момент, когда луч $\bar{a}1$ пересекается с оболочкой газодинамического объекта. Точка этого пересечения P1. В это время фронт распространения луча $\bar{a}2$ находится в точке A. Отрезок P1A перпендикулярен лучам $\bar{a}1$ и $\bar{a}2$, так как до попадания в газодинамический объект среда, в которой распространяется свет, считается изотропной. На первом шаге итераций строим систему координат с началом в точке P1 (xOy)P1, причем ось x совпадает с направлением луча $\bar{a}1$. Смещение системы координат (xOy)P1 относительно системы координат газо-динамического объекта

задается вектором r_1 , а ориентация этой системы координат задается соответствующей матрицей поворота. Через определенный промежуток времени луч $\overline{a1}$ проходит отрезок прямой P1B1 (при расчетах в соответствии с предложенным методом считаем что на отрезке P1B1 плотность газодинамического поля не меняется и равна плотности в точке P1). Длина отрезка P1B1 определяется по следующей формуле [7]:

$$L_{P1B1} = t \cdot n_{P1B1} \cdot c, \quad (1)$$

где L_{P1B1} – длина отрезка P1B1;

n_{P1B1} – коэффициент преломления, соответствующий плотности газодинамического поля в точке P1;

c – скорость света в вакууме.

За это же время луч $\overline{a2}$ проходит расстояние AC.

$$L_{AC} = t \cdot n_{AC} \cdot c;$$

$$L_{AC} = \frac{L_{P1B1}}{n_{P1B1} \cdot c} \cdot n_{AC} \cdot c = \frac{L_{P1B1} \cdot n_{AC}}{n_{P1B1}}, \quad (2)$$

где L_{AC} – длина отрезка AC;

n_{AC} – коэффициент преломления, соответствующий плотности газодинамического поля в точке A.

Для продолжения вычислений необходимо определить ориентацию и местоположение координатной системы $(x_1Oy_1)_{B1}$ относительно системы $(xOy)_{P1}$. Для этого необходимо определить угол α .

$$\alpha = \arctg\left(\frac{L_{CB2}}{L_{B1B2}}\right) = \arctg\left(\frac{L_{AC} - L_{P1B1}}{L_{B1B2}}\right). \quad (3)$$

Смещение координатной системы $(x_1Oy_1)_{B1}$ относительно системы $(xOy)_{P1}$ равно длине отрезка P1B1. Таким образом, мы определили изменение направления фронта волны на отрезке P1B1.

В завершение первого шага итерации определяется смещение (r_2) системы координат $(x_1Oy_1)_{B1}$ и ее ориентация, т.е. матрица поворота относительно системы координат, связанной с газодинамическим объектом. На этом итерация одного шага алгоритма заканчивается. На следующей итерации рассчитывается распространение света от точки B1.

Расчет в соответствии с алгоритмом заканчивается, когда фронт волны выходит из газодинамического объекта.

Определим величину шага Δh , который соответствует отрезку P1B1 и ширину светового потока Δ (отрезок P1A, рис. 2).

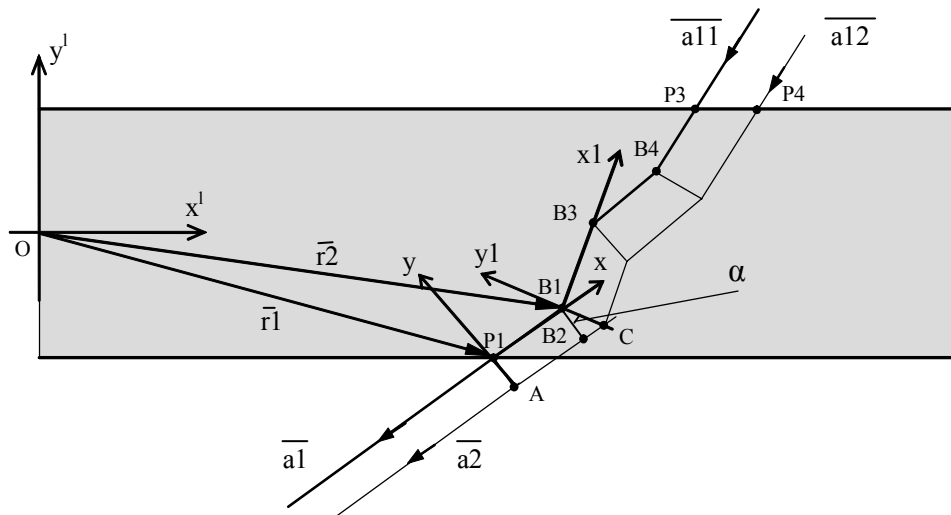


Рис. 2. Путь следования луча света в газодинамическом объекте (двумерный случай)

Ширина светового потока определяется из величины углового разрешения человеческого глаза

$$\Delta = hP_1 \cdot tg\gamma, \quad (4)$$

где hP_1 – расстояние от точки наблюдения до точки входа ПЛ в классификационную оболочку;

γ – угловое разрешение человеческого глаза (принимается равным 2^{-12} рад).

Величина Δh выбирается таким образом, чтобы между двумя соседними точками ломаной свет отклонился от прямолинейного пути распространения

не более чем на ширину светового потока, соответствующего одному световому лучу, при показателе преломления света, соответствующем средней плотности вещества в газодинамическом поле. Запишем соотношение для нахождения Δh (рис. 3):

$$\Delta h = \Delta \cdot \operatorname{ctg} \left(\arccos \frac{n_{\min}}{n_{av}} \right), \quad (5)$$

где n_{\min} – минимальный коэффициент преломления света в газодинамическом объекте; n_{av} – средний коэффициент преломления света в газодинамическом объекте.

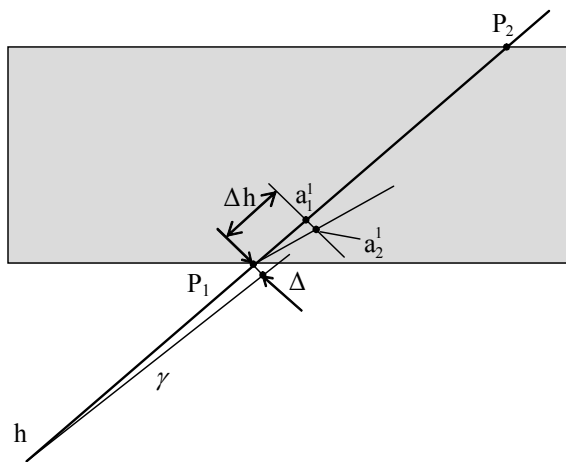


Рис. 3. Определение ширины светового потока Δ и шага итерации Δh (двумерный случай)

Из соотношений (1 – 5) следует относительно малый объем вычислительных затрат при определении следования света в газодинамическом объекте. Поэтому этот метод можно рекомендовать для использования в системах визуализации реального времени. Кроме того, достоинством данного метода является сравнительно высокое физическое соответствие процессам, протекающим в газодинамическом объекте, что позволяет его рекомендовать для визуализации газодинамических явлений при решении научно-исследовательских задач.

Выводы

1. Предложен метод определения пути следования света в газодинамическом объекте на основе волновой теории света.

2. Получены соотношения для определения параметра Δh и ширины светового потока Δ , соответствующего одному световому лучу, позволяющие оптимизировать аппаратные затраты и точность вычислений.

3. Данный метод определения пути следования света в газодинамическом объекте может быть рекомендован для визуализации газодинамических явлений при решении научно-исследовательских задач, а также для использования в системах визуализации реального времени.

Литература

1. Foley J.D., van Dam A., Feiner S.K., Hughes J.F. Computer Graphics (principles and practice) by Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1996. – 1175 p.
2. Майкл Тодд Петерсон. Эффективная работа в 3D Studio Max2. – СПб.: Питер, 1999. – 650 с.
3. Тарасов Л.В., Тарасова А.Н. Беседы о преломлении света / Под ред. В.А. Фабриканта. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 176 с.
4. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. – М.: Наука, 1982. – 500 с.
5. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод «крупных частиц» для задач газовой динамики // Инф. бюл. СО АН СССР "Численные методы механики сплошной среды", 1970. – Т.1. – С. 27.
6. Гусятин В.М. Математическая модель геометрических преобразований для спецпроцессоров растровой графики // Радиоэлектроника и информатика. – 1997. – №1. – С. 86-87.
7. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1981. – 400 с.

Поступила в редакцию 21.03.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. каф. О.Г. Руденко, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.