*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение*

*высшего профессионального образования*

|  |  |
| --- | --- |
| **Gerb-BMSTU_01** | ***«Московский государственный технический университет  имени Н.Э. Баумана»***  ***(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*** |

ФАКУЛЬТЕТ Информатика и системы управления

КАФЕДРА Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии

**РАСЧЁТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

**к курсовому проекту на тему:**

Разработка редактора композиций трехмерных графических

примитивов

Студент **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** Луговой Д.М.

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Руководитель курсового проекта **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** Майков К.А.

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Москва, 2019

Оглавление

[Введение 4](#_Toc26124577)

[1. Аналитический раздел 5](#_Toc26124578)

[1.1 Анализ алгоритмов удаления невидимых линий и поверхностей 5](#_Toc26124579)

[Алгоритм Робертса 5](#_Toc26124580)

[Алгоритм Варнока 6](#_Toc26124581)

[Алгоритм, использующий z-буфер 7](#_Toc26124582)

[Алгоритм трассировки лучей 8](#_Toc26124583)

[Критерии сравнения 8](#_Toc26124584)

[Выбор оптимального алгоритма 9](#_Toc26124585)

[1.2 Анализ алгоритмов закраски 10](#_Toc26124586)

[Простая закраска 10](#_Toc26124587)

[Закраска по Гуро 10](#_Toc26124588)

[Закраска по Фонгу 10](#_Toc26124589)

[Выбор алгоритма закраски 11](#_Toc26124590)

[2. Конструкторский раздел 12](#_Toc26124591)

[2.1 Структуры данных 12](#_Toc26124592)

[2.2 Общий алгоритм построения изображения 13](#_Toc26124593)

[2.1 Аффинные преобразования 14](#_Toc26124594)

[2.2 Камера и перспективная проекция 14](#_Toc26124595)

[2.3 Отбрасывание невидимых граней 14](#_Toc26124596)

[2.4 Отсечение по пирамиде видимости 14](#_Toc26124597)

[2. 5 Алгоритм Z-буфера 14](#_Toc26124598)

[2.6 Модель освещения 14](#_Toc26124599)

[Модель Ламберта 14](#_Toc26124600)

[Модель Фонга 15](#_Toc26124601)

[2.7 Построение теней 17](#_Toc26124602)

# Введение

Целью данного курсового проекта является разработка редактора композиций, состоящих из графических примитивов, геометрические и спектральные характеристики которых задает пользователь. Для формирования более полного представления о полученной сцене должны присутствовать возможности передвижения камеры и изменения пространственных и спектральных характеристик источника освещения.

В рамках реализации проекта должны быть решены следующие задачи:

* Изучение и анализ существующих алгоритмов компьютерной графики, использующихся для создания реалистичной модели взаимно перекрывающихся объектов, и выбор наиболее подходящего для решения поставленной задачи.
* Проектирование архитектуры программы и ее интерфейса.
* Реализация выбранных алгоритмов и структур данных.
* Проведение исследования на основе разработанной программы.

# 1. Аналитический раздел

## 1.1 Анализ алгоритмов удаления невидимых линий и поверхностей

Основной задачей при построении реалистичного изображения является задача удаления объектов или их частей, которые перекрываются другими объектами, то есть являются невидимыми с точки зрения наблюдателя. Выделяют две группы алгоритмов для ее решения:

* Алгоритмы, работающие в объектном пространстве. Данные алгоритмы имеют привязку к мировой или физической системе координат. Получаемые результаты ограничиваются только точностью вычислений, однако требуют большого объема вычислений, зависящего от требуемой точности и сложности поступающей на вход сцены. В эту группу входят алгоритм Робертса, алгоритм со списком приоритетов и т.д.
* Алгоритмы, работающие в пространстве изображения. Данные алгоритмы предполагают привязку к системе координат экрана или картинной плоскости, на которую производится проецирование изображаемых объектов. Объем требуемых вычислений значительно меньше, чем у алгоритмов первой группы, и зависит от разрешающей способности экрана и количества объектов на сцене. Основными представителями данной группы являются алгоритм Варнока, алгоритм Z-буфера и алгоритм трассировки лучей.

Для выбора наиболее оптимального алгоритма из перечисленных необходимо осуществить их краткий обзор, отобрать критерии для сравнения и выявить алгоритм, который удовлетворяет всем или большинству критериев.

### Алгоритм Робертса

Алгоритм Робертса представляет собой первое известное решение задачи об удалении невидимых линий. В соответствии с алгоритмом, вначале из каждого тела удаляются те ребра или грани, которые перекрываются самим телом. Затем каждое из видимых ребер каждого тела сравнивается с каждым из оставшихся тел для определения того, какая его часть перекрывается этими телами.

Преимущество данного алгоритма в том, что математические методы, используемые в нем просты и точны.

Недостатком этого алгоритма является большая, по сравнению с алгоритмами, работающими в пространстве изображения, трудоемкость, которая пропорциональна квадрату количества объектов на сцене.

### Алгоритм Варнока

Основной идеей данного алгоритма является принцип "разделяй и властвуй", заключающийся в разбиении области рисунка на более мелкие подобласти. Для каждой подобласти определяются связанные с ней многоугольники и те из них, видимость которых тривиальна, изображаются на экране. В случае невозможности однозначно определить видимость части многоугольника разбиение области повторяется, и для каждой из вновь полученных подобластей рекурсивно применяется процедура определения видимости. Предполагается, что с уменьшением размеров области количество перекрывающих ее многоугольников сокращается. В результате получаются области, содержащие не более одного многоугольника, либо разбиение продолжается до тех пор, пока размер области не станет равен одному пикселю. В этом случае для полученного пикселя вычисляется значение глубины каждого многоугольника (координата Z), и визуализируется тот из них, у которого значение этой координаты больше.

Достоинством данного алгоритма является простота реализации и высокая эффективность в случае, если размеры перекрываемых областей невелики.

Его недостатком является использование рекурсивных вызовов, что значительно снижает скорость выполнения в случае больших размеров перекрываемых областей.

### Алгоритм, использующий z-буфер

Данный алгоритм удаления невидимых поверхностей является одним из самых простых и широко используемых. Его идея заключается в использовании двух буферов: буфера кадра и буфера глубины, также называемого Z-буфером. Буфер кадра используется для хранения спектральных характеристик каждого пикселя в пространстве изображения. В буфере глубины запоминается значение координаты Z (глубины) каждого видимого пикселя в пространстве изображения. В процессе работы значение глубины каждого нового пикселя, заносимого в буфер кадра, сравнивается с глубиной того пикселя, который уже занесен в Z-буфер. Если это сравнение показывает, что новый пиксель расположен ближе к наблюдателю, чем пиксель, уже находящийся в буфере кадра, то новый пиксель заносится в буфер кадра и производится корректировка Z-буфера: в него заносится глубина нового пикселя. Если же значение глубины нового пикселя меньше, чем хранящееся в буфере, то осуществляется переход к следующей точке.

Основными достоинствами данного алгоритма являются простота его реализации, корректная обработка случаев взаимных пересечений объектов, линейная зависимость трудоемкости от числа объектов на сцене, а также отсутствие необходимости предварительной сортировки объектов по глубине, то есть они могут обрабатываться в произвольном порядке.

К недостаткам данного алгоритма относят необходимость выделения памяти под два буфера, каждый из которых имеет размер равный количеству пикселей на экране.

### Алгоритм трассировки лучей

В этом методе для каждого пикселя картинной плоскости определяется ближайшая к нему грань, для чего через этот пиксель выпускается луч, находятся все его пересечения с гранями и среди них выбирается ближайшая.

К достоинствам данного алгоритма можно отнести возможность получения изображения гладких объектов без аппроксимации их примитивами (например, треугольниками). Вычислительная сложность метода линейно зависит от сложности сцены. Благодаря отслеживанию пути, пройденного лучом, появляется возможность реализовать глобальную модель освещения, учитывающую отражения и преломления света. Качество полученного изображения получается очень реалистичным, этот метод отлично подходит для создания фотореалистичных картин.

Главным недостатком алгоритма трассировки является необходимость создавать огромное число лучей, проходящих через сцену, которые могут раздваиваться на отраженный и преломленный лучи. Это приводит к существенному снижению скорости работы программы.

### Критерии сравнения

При реализации редактора композиций из графических примитивов необходимо обеспечить плавную смену кадров при перемещении камеры и изменении объектов, поэтому основными критериями сравнения алгоритмов являются зависимость трудоемкости алгоритма от числа объектов на экране и использование рекурсивных вызовов.

Так как в наше время среднестатистический компьютер имеет 8 ГБ оперативной памяти [1], то факт задействования дополнительной памяти под буферы не является весомым критерием и может быть опущен.

В связи с ограниченностью времени выполнения курсового проекта значимым критерием отбора алгоритма является простота его реализации, а также то, насколько широко используется алгоритм в современных приложениях.

### Выбор оптимального алгоритма

По критерию использования рекурсивных вызовов оптимальными алгоритмами являются алгоритмы Робертса и Z-буфера, однако алгоритм Робертса имеет квадратичную зависимость от числа объектов на сцене, в то время как алгоритм Z-буфера – линейную.

Алгоритмы Варнока и Z-буфера имеют наименьшую сложность реализации, так как работают непосредственно с пикселями экрана и не требуют решения задачи нахождения пересечения граней объектов.

Наибольшее распространение в современном программном обеспечении получили алгоритмы трассировки лучей и Z-буфера: алгоритм Z-буфера используется в большинстве графических движков, в то время как алгоритм трассировки лучей используется в ПО для создания фотореалистичных сцен.

Как видно из таблицы 1.1.1, алгоритмом, соответствующим всем выделенным критериям, является алгоритм Z-буфера. Поэтому именно этот алгоритм предлагается для реализации в рамках данного курсового проекта.

Таблица 1.1.1 – Сравнение алгоритмов удаления невидимых линий и поверхностей

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Алгоритм | Робертса | Варнока | Z-буфера | Трассировки лучей |
| Использование рекурсивных вызовов | - | + | - | + |
| Зависимость трудоемкости от числа объектов (N) |  | N, но зависит от положения объектов | N | N, но зависит от модели освещения |
| Сложность реализации | Средняя | Низкая | Низкая | Средняя |
| Распространенность в современном ПО | Нет | Нет | Широкая | Широкая |

## 1.2 Анализ алгоритмов закраски

Существуют три основных алгоритма, позволяющих закрасить полигональную модель: простая закраска, закраска по Гуро и закраска по Фонгу.

### Простая закраска

Суть данного алгоритма заключается в том, что для каждой грани объекта находится вектор нормали и с его помощью в соответствии с выбранной моделью освещения вычисляется значение интенсивности, с которой закрашивается вся грань. Данный метод закраски обладает большим быстродействием, однако видны все переходы между гранями.

### Закраска по Гуро

Данный метод принципиально отличается от простой закраски тем, что разные точки грани закрашиваются с разными значениями интенсивности. Для это в каждой вершине грани находится вектор нормали и вычисляется значение интенсивности. Затем найденные значения интенсивности интерполируются по всем точкам грани. С помощью этого метода получаются достаточно реалистичные изображения, однако все объекты кажутся матовыми.

### Закраска по Фонгу

Закраска Фонга по своей идее похожа на закраску Гуро, отличие состоит в том, что в методе Гуро по всем точкам интерполируется значение интенсивности, а в методе Фонга – вектора нормалей, и с их помощью для каждой точки находится значение интенсивности. Эта закраска требует больших вычислительных затрат, однако она позволяет разрешить многие проблемы метода Гуро. Достигается лучшая локальная аппроксимация кривизны поверхности и, следовательно, получается более реалистичное изображение. В частности, правдоподобнее выглядят зеркальные блики.

### Выбор алгоритма закраски

На рисунке 1.2.1 наглядно показаны различия рассмотренных методов закраски.



Рисунок 1.2.1 – Методы закраски (слева направо: плоская, Гуро, Фонга)

Алгоритм закраски Фонга требует большего числа вычислений по сравнению с другими, однако он дает наиболее реалистичное изображение, в частности зеркальных бликов. В данном курсовом проекте пользователь должен иметь возможность задавать спектральные характеристики объектов, поэтому для получения более реалистичной сцены предлагается использовать метод закраски Фонга.

# 2. Конструкторский раздел

## 2.1 Структуры данных

Для формализации общего алгоритма синтеза изображения в данной программе, необходимо ввести определения использующихся в ней структур данных:

1. Сцена представляет собой список с произвольным числом моделей, объект камеры и объект источника освещения.
2. Модель включает следующие данные:

* Массив вершин фигуры
* Массив полигонов фигуры
* Массив векторов нормалей к вершинам
* Коэффициенты отражения и блеска поверхности
* Цвет поверхности
* Матрицы аффинных преобразований

1. Камера содержит:

* Положение в пространстве
* Значения углов тангажа и рыскания
* Систему координат камеры, задаваемую тремя ортогональными векторами
* Угол обзора и соотношение сторон экрана
* Границы пирамиды видимости

1. Источник освещения включает:

* Положение в пространстве
* Цвет источника

## 2.2 Общий алгоритм построения изображения

Вход: Геометрические характеристики моделей, камеры, источника освещения, спектральные характеристики моделей и источника освещения.

Выход: Изображение сцены

Общая схема алгоритма генерации изображения представлена на рисунке 2.2.1.



Рисунок 2.2.1 – Общая схема алгоритма синтеза изображения

## 2.3 Аффинные преобразования

В представленном алгоритме синтеза изображения первым этапом преобразования полигона перед его растеризацией является переход из пространства модели в пространство вида. Это действие осуществляется с помощью матриц аффинных преобразований. В данном курсовом проекте над объектами возможно произвести следующие операции:

* Поворот вокруг координатных осей

Поворот описывается углом θ и осью вращения. Матрицы поворота имеют вид:

* + Вокруг оси OX:
  + Вокруг оси OY:
  + Вокруг оси OZ:
* Перенос вдоль координатных осей

Перенос в трехмерном пространстве задается значениями переноса вдоль осей OX, OY, OZ - dx, dy, dz соответственно. Матрица переноса имеет вид:

## 2.4 Камера и перспективная проекция

Для перемещения по сцене используется камера, задаваемая точкой положения в пространстве, пирамидой видимости и собственной системой координат, которая состоит из трёх ортогональных векторов.

Пусть

* P – положение камеры,
* D - вектор взгляда,
* U – вектор вверх,
* R - вектор вправо.

Переход в пространство камеры осуществляется в 2 этапа:

1. Перенос полигона в отрицательную сторону от камеры на   
   расстояние P с помощью матрицы переноса:
2. Преобразование полигона к системе координат камеры при помощи матрицы поворота:

Для удобства в данном курсовом проекте управление системой координат камеры производится с помощью изменения углов Эйлера.

Пусть

* pitch – тангаж,
* yaw – рыскание.

Тогда вектор направления камеры можно вычислить по формулам:

После перехода в пространство камеры необходимо спроецировать полигон на картинную плоскость. В данном курсовом проекте используется перспективная проекция.

Пусть

* zoomx – приближение по X,
* zoomy – приближение по Y,
* ratio – соотношение сторон экрана,
* far – расстояние от камеры до задней грани пирамиды видимости,
* near – расстояние от камеры до передней грани пирамиды видимости,
* fov – вертикальный угол обзора.

Увеличение объектов по координатам X и Y можно вычислить по формулам:

Для перехода в пространство отсечения используется матрица перспективной проекции:

## 2.5 Отбрасывание невидимых граней

С помощью отбрасывания нелицевых граней моделей при построении изображения можно существенно сократить время работы алгоритма, так как не будет тратиться время на растеризацию полигонов, невидимые по отношению к камере.

Пусть

* – вектор нормали к грани модели,
* – вектор от камеры до любой точки грани

Для определения видимости грани используется формула:

## 2.6 Отсечение по пирамиде видимости

Отсечение полигона по пирамиде видимости решает две задачи:

1. Удаление полигонов, лежащих за камерой, но проецируемых на картинную плоскость в перевернутом виде.
2. Сокращение времени на растеризацию полигонов, за счет удаления их невидимых частей.

Для выполнения операции отсечения в данном курсовом проекте использовался алгоритм Сазерленда-Ходжмана. Согласно рисунку 2.6.1, его идея состоит в том, чтобы последовательно отсекать полигон относительно каждой грани пирамиды видимости до тех пор, пока полигон не будет отсечен полностью либо пока все грани не будут пройдены.



Рисунок 2.6.1 – Схема алгоритма Сазерленда-Ходжмана

## 2. 7 Алгоритм Z-буфера

Для растеризации треугольного полигона сначала необходимо найти ограничивающий прямоугольник, в котором это полигон содержится. Это делается для того, чтобы не тратить время на растеризацию пикселей, не являющихся частью полигона. Затем для каждого пикселя ограничивающего прямоугольника находятся его барицентрические координаты относительно вершин полигона.

Пусть

* A, B, C – вершины полигона,
* P – пиксель внутри ограничивающего прямоугольника.

Площадь треугольника можно найти по следующей формуле:

Тогда барицентрические координаты пикселя равны:

В случае, если хоть одна из барицентрических координат отрицательна, пиксель лежит вне полигона. Если пиксель лежит внутри треугольника, то найти значение его глубины можно по следующей формуле:

Затем производится сравнение значения глубины точки со значением глубины из Z-буфера. Если глубина пикселя меньше, значит он лежит ближе к камере и должен быть растеризован. Происходит вычисление цвета пикселя, его значение заносится в буфер кадра, а в Z-буфер заносится значение глубины пикселя. Полная схема алгоритма Z-буфера представлена на рисунке 2.7.1.



Рисунок 2.7.1 – Схема алгоритма Z-буфера

## 2.8 Модель освещения

Все модели освещения делятся на два вида: глобальные и локальные. Глобальные модели учитывают возможности отражения и преломления света от объектов, не являющихся прямыми источниками освещения, поэтому они требуют значительных затрат.

Существуют более простые, локальные модели освещения, которые учитывают только свет от источника. Именно эти модели используются в данном курсовом проекте. Выделяют две основные модели локального освещения: модель Ламберта и модель Фонга.

### Модель Ламберта

Данная модель является простейшей моделью освещения, так как учитывает только идеальное диффузное отражение света от тела. На рисунке 2.8.1 показано, что согласно этой модели, освещенность в точке определяется только плотностью света в точке поверхности, а она линейно зависит от косинуса угла падения. При этом положение наблюдателя не имеет значения, т.к. диффузно отраженный свет рассеивается равномерно по всем направлениям.

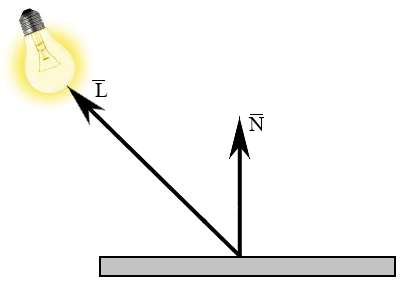


Рисунок 2.8.1 – Модель освещения Ламберта

Пусть

* – вектор от точки до источника,
* – вектор нормали,
* I – результирующая интенсивность света в точке,
* I0 – интенсивность источника,
* Kd – коэффициент диффузного освещения

Формула расчёта интенсивности имеет следующий вид:

Из формулы (1) следует главный недостаток модели Ламберта – одинаковая интенсивность во всех точках, принадлежащих одной грани.

### Модель Фонга

Модель Фонга включает в себя модель Ламберта, но также учитывает тот факт, что кроме диффузного отражения на материале может появляться блик, то есть зеркальное отражение. Падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к отражающей поверхности в точке падения, и эта нормаль делит угол между лучами на две равные части как показано на рисунке 2.8.2.

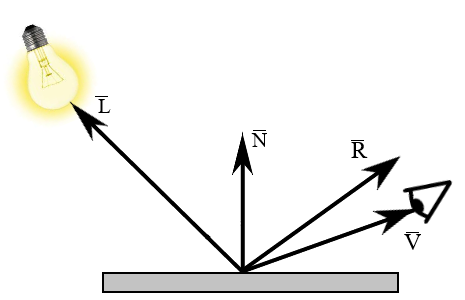


Рисунок 2.8.2 – Модель освещения Фонга

Отраженная составляющая освещенности в точке зависит от того, насколько близки направления на наблюдателя и отраженного луча.

Также в модели освещения Фонга используется понятие рассеянного освещения – это константа, которая прибавляется к интенсивности в точке для придания сцене большего реализма.

Таким образом, согласно модели Фонга интенсивность к точке складывается из 3 компонент: диффузной, зеркальной и рассеянной, как показано на рисунке 2.8.3.

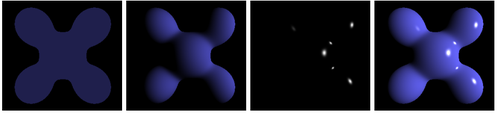


Рисунок 2.8.3 – Составляющие модели Фонга (слева направо: рассеянная, диффузная, зеркальная, суммарная)

Пусть

* – вектор отраженного луча,
* – вектор от точки до наблюдателя,
* Ip – интенсивность рассеянного освещения,
* кз – коэффициент зеркального освещения,
* ка – коэффициент рассеянного освещения,
* α - коэффициент блеска

Формула для расчета интенсивности для модели Фонга имеет вид:

## 2.9 Построение теней

Одним из основных факторов, влияющих на корректное восприятие построенного изображения, является генерация реалистичных теней. С их помощью человек лучше понимает положение различных объектов в пространстве относительно друг друга, у него складывается более полное представление созданной сцены.

Многие приложения не поддерживают динамическое построение теней, либо закрепляя объекты на месте, просчитав тени только при инициализации сцены, либо полностью убирая тени, тем самым создавая сложную для восприятия картинку. Это объясняется сложностью сохранения плавности изображения, так как просчет реалистичных динамических теней требует значительных ресурсов компьютера и сильно снижает кадровую частоту.