

Формирование реалистичного изображения бриллианта разной огранки с учетом оптических свойств материала

Саркисов Артём ИУ7-53Б

г. Москва 2020

Цель проекта

Целью проекта является разработка программы для формирования реалистичного изображения бриллианта разной огранки, при различном освещении с учетом оптических свойств материала.



Задачи

- провести анализ существующих алгоритмов построения трёхмерного изображения и выбрать из них подходящие для выполнения проекта;
- провести анализ существующих моделей освещения и выбрать из них подходящие для выполнения проекта;
- выбрать подходящий язык программирования для реализации поставленной задачи;
- реализовать интерфейс программного модуля.

Алгоритм формирования реалистичного изображения бриллианта

- Алгоритм обратной трассировки лучей;
- Отражение Френеля;
- Объемное поглощение;
- Рассеивание света;
- Модель освещения Уиттеда;
- Нахождение отражённого и преломлённого лучей;
- Расчёт интенсивностей.

Алгоритм обратной трассировки лучей

- I. Определить первый луч (луч, выпущенный из камеры), найти точку пересечения этого луча с объектом.
- II. Далее необходимо определить для каждого источника освещения, видна ли из него эта точка. Тогда в направлении каждого точечного источника света испускается теневой луч из точки пересечения первого луча и объекта. Это позволяет определить, освещается ли данная точка конкретным источником.
- III. Далее, если материал объекта имеет отражающие свойства, из точки испускается отраженный луч и для него вся процедура трассировки рекурсивно повторяется. Аналогичные действия должны быть выполнены, если материал имеет преломляющие свойства.

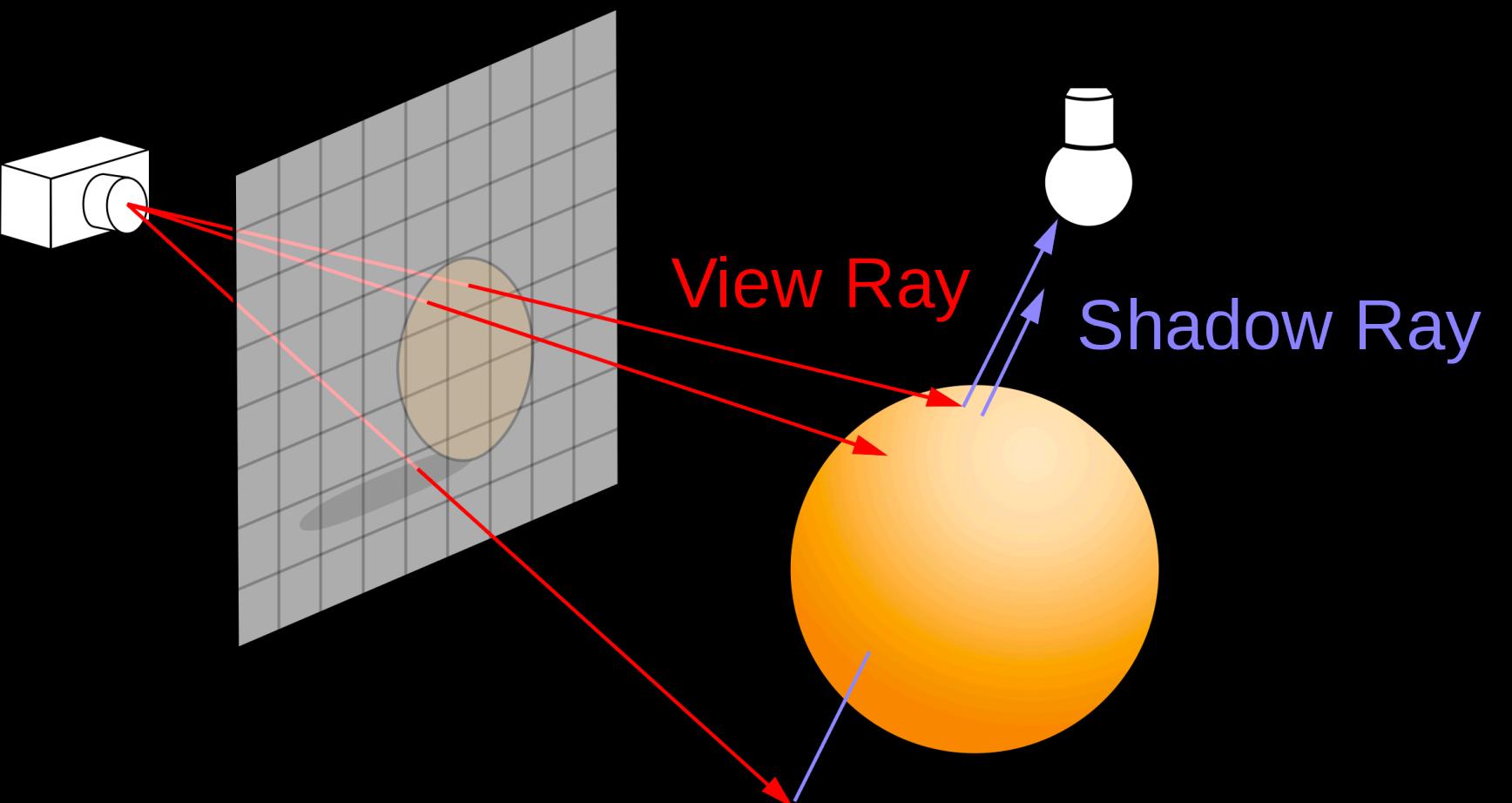
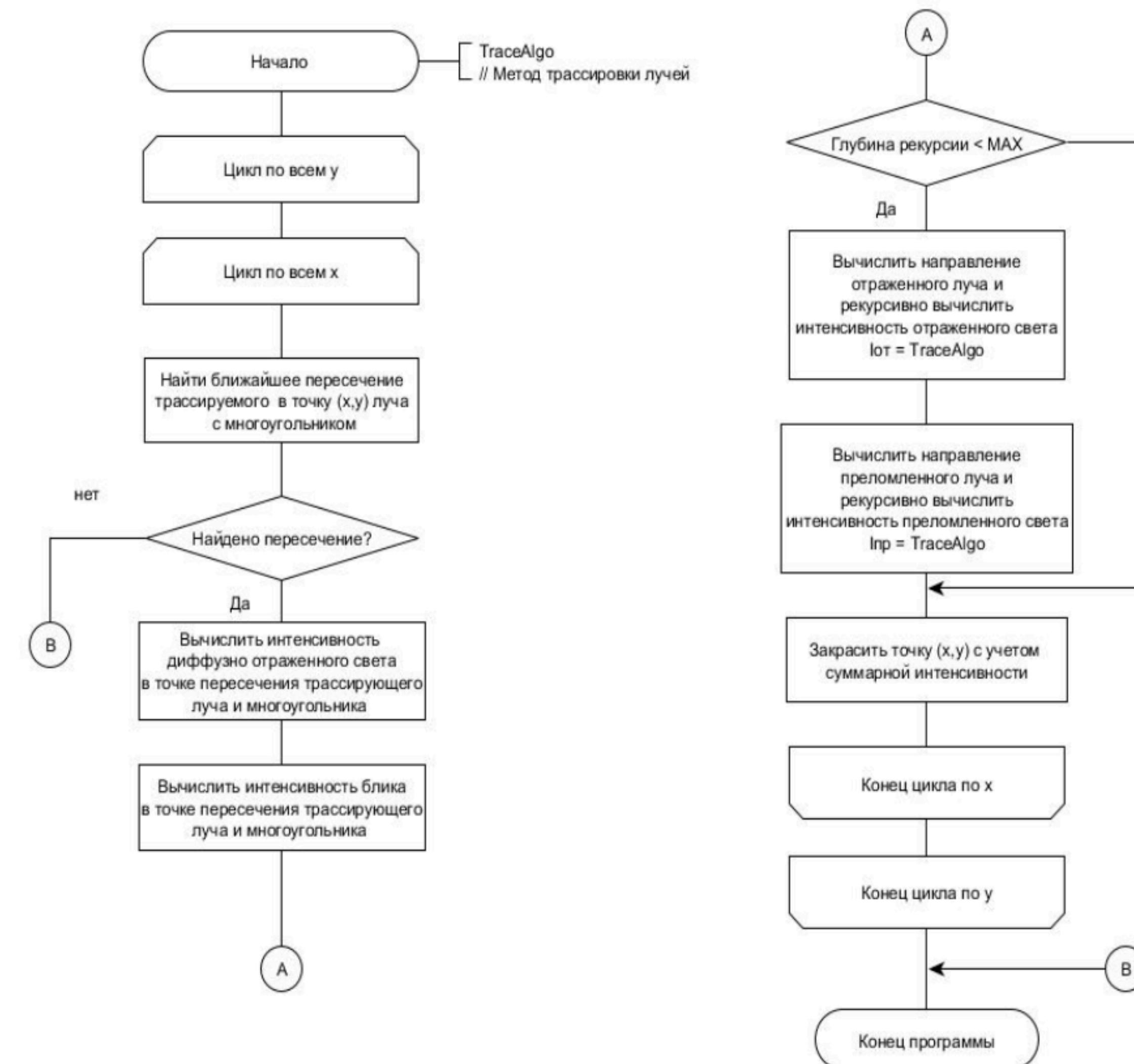


Схема алгоритма обратной трассировки лучей



Отражение Френеля

Когда световая волна отражается от границы, коэффициент отражения (отношение отражающей энергии к падающей энергии) зависит не только от угла падения и электрических свойств отражающего материала, но и от поляризации падающей световой волны.

$R_{||}$ и R_{\perp} (называемые коэффициентами Френеля) соответствуют поляризациям, которые параллельны и перпендикулярны плоскости падения, n_1 и n_2 – показатели преломления сред, а θ_i и θ_t – углы падения и отражения. Если поляризацией пренебречь, отражение можно описать одним коэффициентом R (2):

$$\begin{cases} R_{||} = \left(\frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right)^2 = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \\ R_{\perp} = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} \end{cases}$$

$$R = \frac{1}{2} (R_{||} + R_{\perp})$$

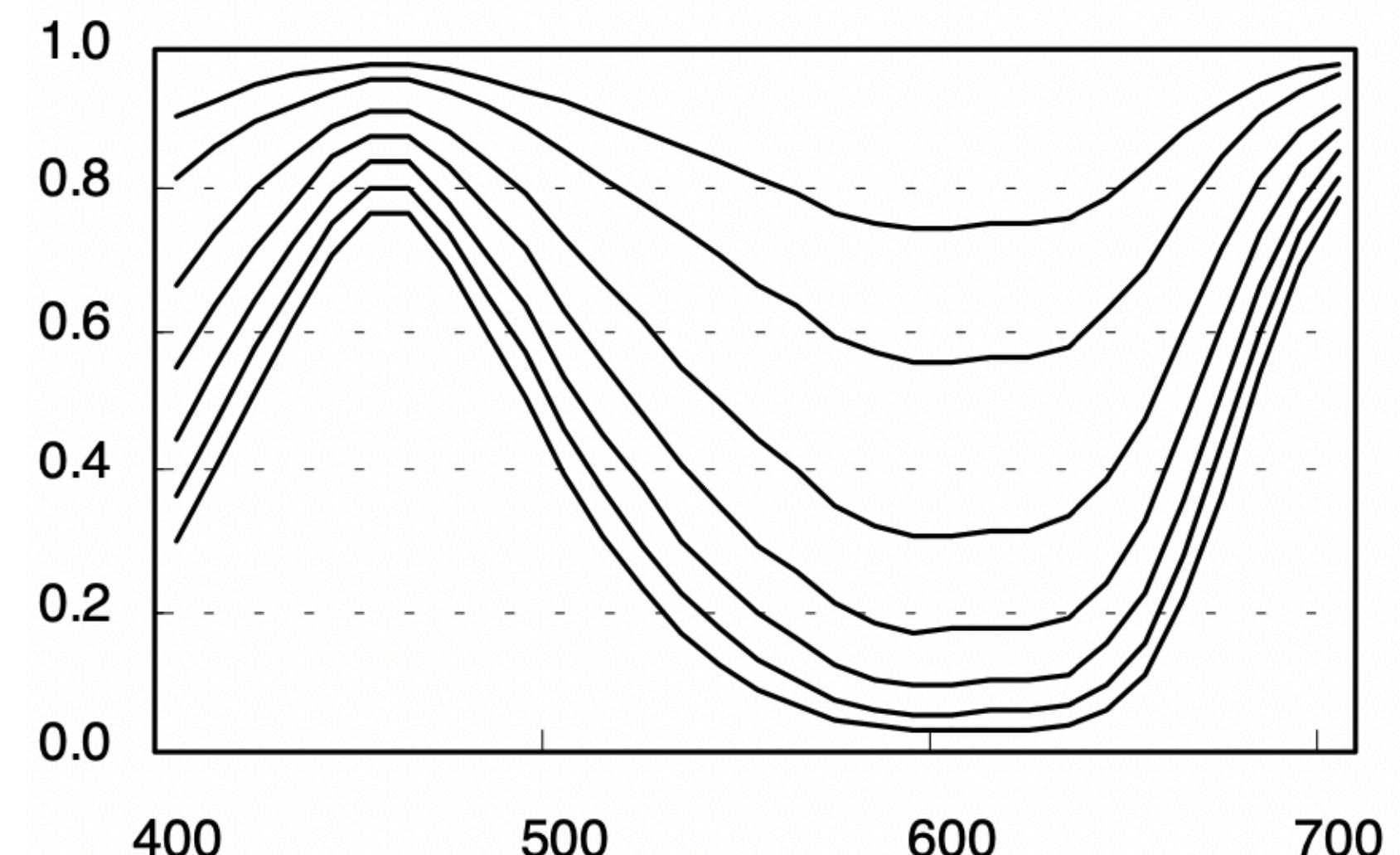
Объёмное поглощение

Объемное поглощение формирует внешний вид цветных бриллиантов. Согласно закону Бугера–Ламбертиана, внутреннее пропускание света, движущегося от одной точки к другой внутри прозрачного материала можно описать формулой (->).

Где $a(\lambda)$ – поглощающая способность материала, а l – длина светового пути. Согласно этому закону, увеличение l не только снижает интенсивность и углубляет цветовую насыщенность света, но также может изменять его оттенок. Это соотношение можно увидеть из спектральных кривых на рисунке (->)

По этой причине объемное поглощение может вызывать появление различных, но связанных цветов на цветных бриллиантах.

$$T_{\text{internal}}(\lambda) = 10^{-a(\lambda)l}$$



Рассеивание света

Рассеивание света – это оптическое явление, при котором свет распадается на монохроматические компоненты и окрашивается в рассеивающих объектах, таких как бриллианты. Это вызвано зависимостью показателя преломления материала от длины волны.

Рассмотрим луч света, попадающий из воздуха в алмаз с показателем преломления $n(\lambda)$ с углом падения θ_i . Угол преломления $\theta_r(\lambda)$ зависит от длины волны в соответствии с законом Снеллиуса (\rightarrow)

Основная идея составной спектральной модели состоит в том, чтобы разложить спектральную функцию на гладкую составляющую и набор пиков. Гладкий компонент можно представить в виде выборки, а шип – в виде его местоположения и веса (или высоты). Аналитически выражая эту идею, любую спектральную функцию $S(\lambda)$ можно записать как (\rightarrow)

Одним из преимуществ этой модели является ее линейность в вычислительной мощности. При рендеринге изображений на основе спектра общая эффективность в значительной степени определяется эффективностью спектрального умножения, поскольку такое вычисление связано с каждым отражением и передачей.

$$\sin[\theta_r(\lambda)] = \frac{\sin(\theta_i)}{n(\lambda)}$$

$$\begin{aligned} S(\lambda) &= S_{\text{smooth}}(\lambda) + S_{\text{spiky}}(\lambda) \\ &= S_{\text{smooth}}(\lambda) + \sum_{m=1}^M w_m \delta(\lambda - l_m) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{\text{smooth}}(l_m) \delta(\lambda - l_m) &= \frac{(l_m - \lambda_i)}{\Delta\lambda} S_{\text{smooth}}(\lambda_i) \\ &\quad + \frac{(\lambda_{i+1} - l_m)}{\Delta\lambda} S_{\text{smooth}}(\lambda_{i+1}) \end{aligned}$$

Модель освещения Уиттеда

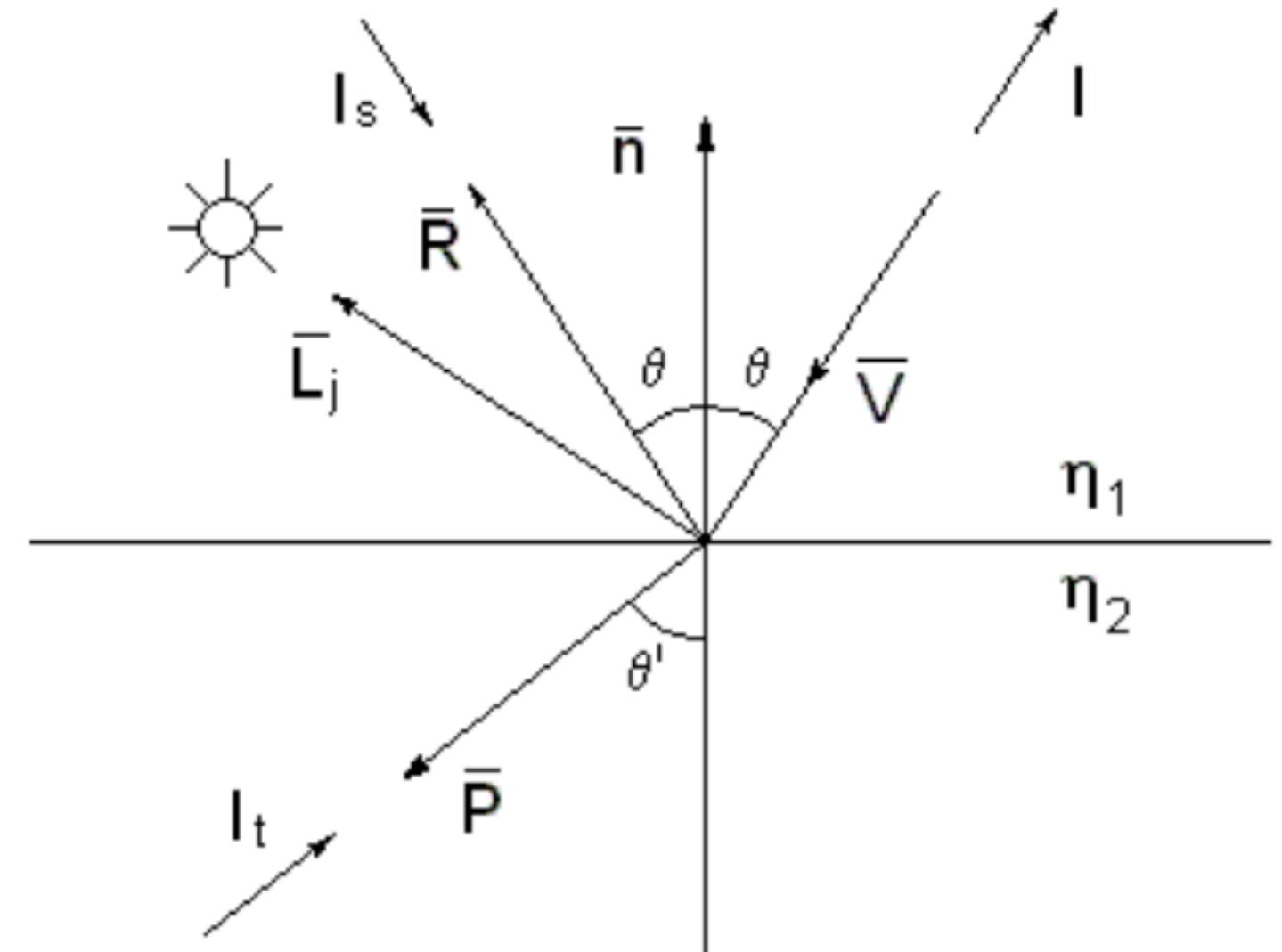
Модель освещения предназначена для того, чтобы рассчитать интенсивность отраженного к наблюдателю света в каждом пикселе изображения. Она может быть локальной или глобальной.

В первом случае во внимание принимается только свет, падающий от источника (источников), и ориентация поверхности.

Во втором учитывается также свет, отраженный от других объектов сцены или пропущенный сквозь них, как показано на рисунке (->), где V - направление взгляда, R - отраженный луч направления взгляда, P - преломленный луч направления взгляда, L - направление на источник освещения, n_1 , n_2 - показатели преломления сред.

Согласно модели Уиттеда наблюдаемая интенсивность определяется суммарной интенсивностью (->)

Модель Уиттеда учитывает эффекты преломления и отражения, зеркальности.



$$I = k_a I_a C + k_d I_d C + k_s I_s + k_r I_r + k_t I_t,$$

где

k_a - коэффициент рассеянного отражения;

k_d - коэффициент диффузного отражения;

k_s - коэффициент зеркальности;

k_r - коэффициент отражения;

k_t - коэффициент преломления;

I_a - интенсивность фонового освещения;

I_d - интенсивность, учитываемая для диффузного рассеивания;

I_s - интенсивность, учитываемая для зеркальности;

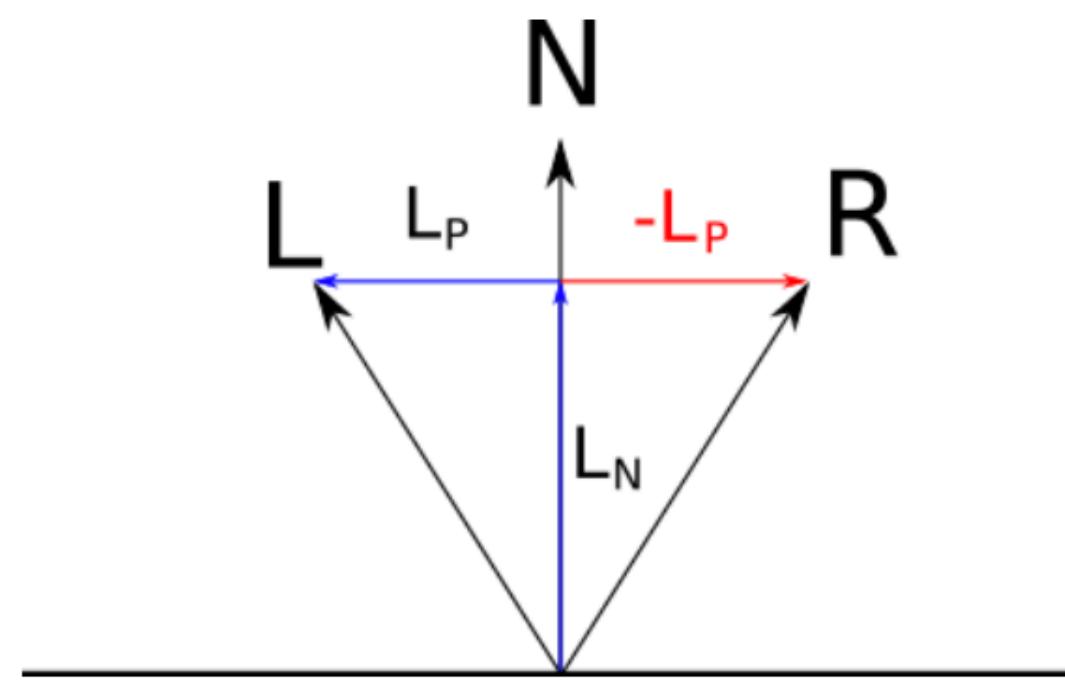
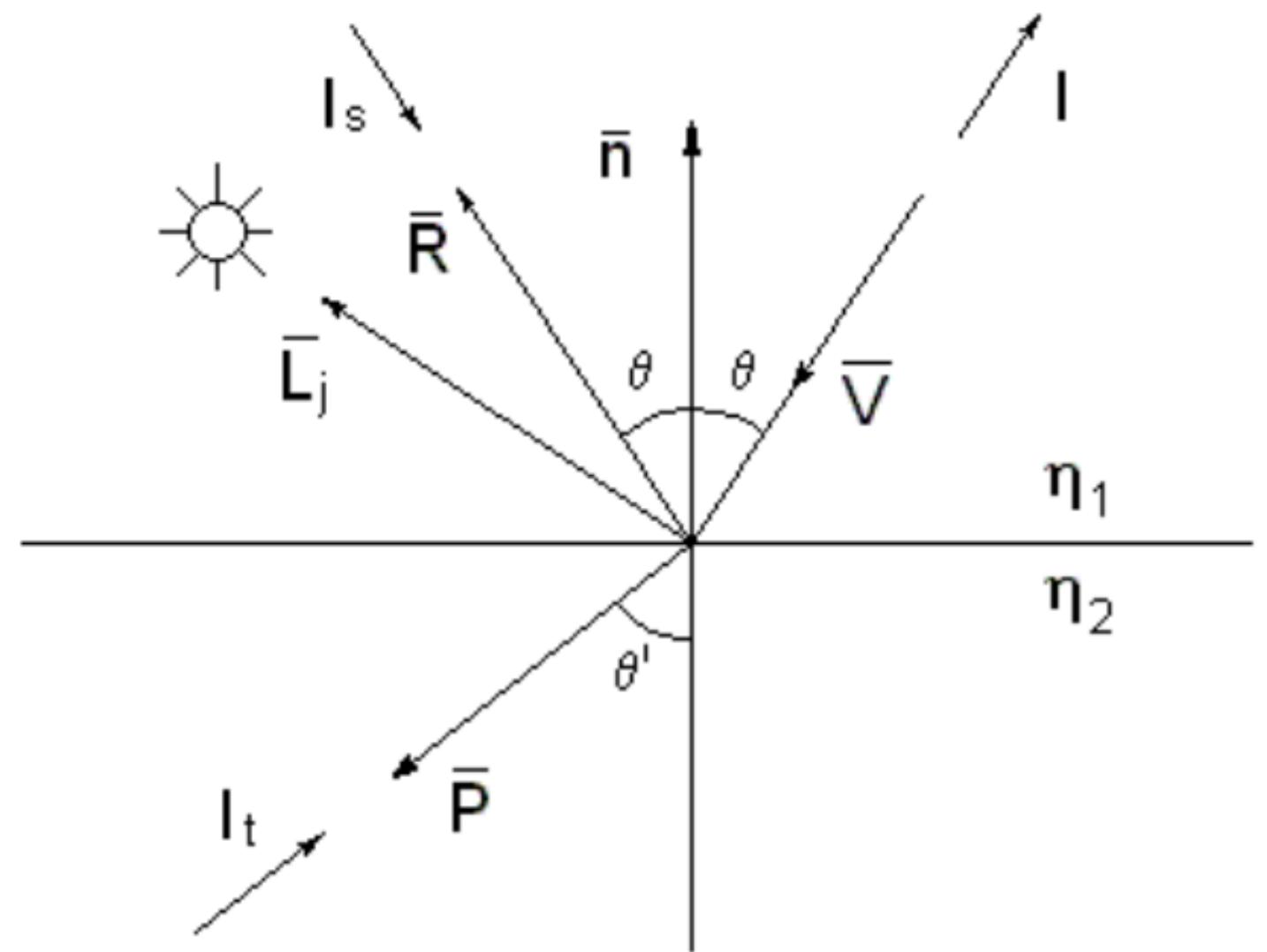
I_r - интенсивность излучения, приходящего по отраженному лучу;

Нахождение отражённого луча

Для нахождения направлений преломлённого и отражённого лучей достаточно знать направление падающего луча L и нормали к поверхности N в точке падения луча. Направление падающего луча и нормали к поверхности на данном этапе известны. L раскладывается на два вектора L_p и L_n , где L_n параллелен N , а L_p перпендикулярен, как изображено на рисунке (->).

L_n – проекция L на N по свойствам скалярного произведения и исходя из того, что $|N| = 1$, длина этой проекции равна (N, L) , поэтому $L_n = N(N, L)$. Отсюда $L_p = L - L_n = L - N(N, L)$.

Очевидно, что $R = L_n - L_p$. Подставим полученные ранее выражения и упростим, получим: $R = 2N(N, L) - L$ – Направление отраженного луча.



Нахождение преломлённого луча

Преломленный луч Р можно рассчитать из закона преломления. Он звучит следующим образом – луч падающий, луч преломленный и нормаль к поверхности в точке преломления лежат в одной плоскости. Углы падения и преломления при этом связаны следующим соотношением, называемым законом Снеллиуса (->)

$$\eta_i \sin \theta_i = \eta_t \sin \theta_t$$

η_i — показатель преломления среды, из которой свет падает на границу раздела двух сред;

θ_i — угол падения света — угол между падающим на поверхность лучом и нормалью к поверхности;

η_t — показатель преломления среды, в которую свет попадает, пройдя границу раздела двух сред;

θ_t — угол преломления света — угол между прошедшим через поверхность лучом и нормалью к поверхности.

Можно получить:

$$\vec{P} = \frac{n_1}{n_2} * \vec{L} + \left(\frac{n_1}{n_2} * \cos(\theta_i) - \sqrt{1 - \sin^2(\theta_t)} \right) * \vec{N}$$

При этом $\sin^2(\theta_t) = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 * \sin^2 (\theta_i)$

Где θ_i – угол падения, θ_t – угол преломления, n_2 и n_1 – абсолютные показатели преломления двух сред.

Расчёт интенсивностей

Общая интенсивность цвета в определённой точке – это совокупность интенсивности света, диффузно отражающегося в точке поверхности и интенсивность света, отраженного зеркально.

Общую интенсивность можно определить по формуле (->)

$$I_r = k_a \sum I_{ia} + k_d \sum I_i * (\vec{n}, \vec{L}_i) + k_s \sum I_i * (\vec{S}, \vec{R}_i)^N + k_r I_r + k_t I_t,$$

где

I_r и I_t – интенсивности, принесенные составляющими оттравсированных отраженного и преломленного лучей, I_{ia} - составляющие рассеянного освещения от i-го источника,

k_a - коэффициент рассеянного отражения,

k_d - коэффициент диффузного отражения,

k_s - коэффициент зеркальности,

k_r - коэффициент отражения,

k_t - коэффициент преломления.

Описание основных модулей программы

Модуль	Функционал
main	Точка входа в программу и сборка всей сцены
gem_models	Описание модели бриллиантов разной огранки, как объектов сцены (координаты объекта)
gem_material	Описание модели бриллианта с точки зрения оптических свойств материала
ray_tracer	Описание алгоритма обратной трассировки лучей
light	Описание модели освещения
rotation	Описание модуля поворота объекта на сцене
gui	Описание модуля интерфейса

Структура и классы программы

struct Color – описывает цвет по трём составляющим (RGB).

struct Cord – описывает координату в трёхмерном пространстве (x, y, z).

class Vector3 – описывает вектор трёхмерного пространства и основные методы для работы с ним.

class Material – описывает материал объекта, его основные свойства и цвет.

class Light – используется для описания источника освещения. Содержит позицию источника и цвет излучения.

class Vertex – описывает вершину в трёхмерном пространстве.

class Primitive – базовый класс, хранит информацию о материале объекта и прототипы методов проверки на пересечения и поиски нормали.

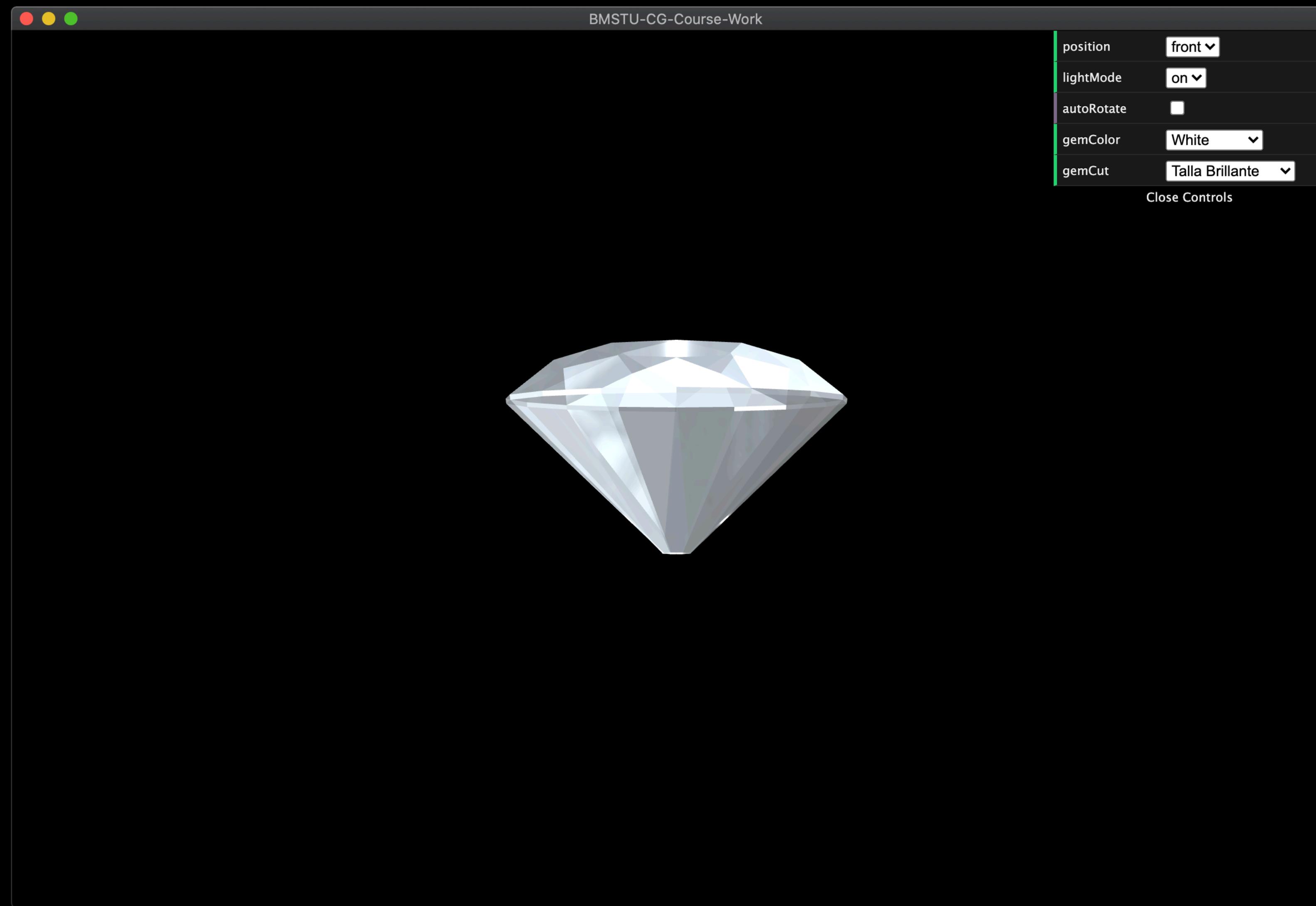
class Triangle – описывает полигон (треугольник). Потомок класса Primitive. Хранит три вершины и координаты нормали. Обладает собственными методами проверки на пересечение и поиска нормали.

class Scene – описывает сцену. Хранит количество примитивов, количество источников освещения, указатели на массивы вершин, примитивов и источников освещения.

class Engine – основной класс программы. Содержит методы трассировки лучей, поиска пересечения.

class Ray – описывает луч. Содержит текущее положение, направление. Методы доступа и изменения положения и направления.

Пользовательский интерфейс



Описание пользовательского интерфейса

Position — параметр, отвечающий за позицию камеры;

Light Mode — параметр, отвечающий за присутствие света на сцене;

Auto Rotate — параметр, отвечающий за циклический поворот объекта вокруг своей оси;

Gem Color — параметр, отвечающий за цвет бриллианта на сцене;

Gem Cut — параметр, отвечающий за огранку бриллианта на сцене;

Close Controls — кнопка для того, чтобы скрыть панель управления.



Эксперимент

Основной целью курсовой работы было написание законченного программного продукта и нахождения некоторых закономерностей в алгоритмах, их анализ и проведение некоторых экспериментов связанных с этим анализом. Так как алгоритм обратной трассировки лучей является далеко не самым быстрым, то естественно напрашивалось исследовать время генерации изображения в зависимости от различных факторов. Была исследована зависимость скорости генерации изображения от свойств материала. Свойства бриллианта менялись в каждом опыте, но его размер и положение оставалось неизменным.



Результаты эксперимента

Было проведено четыре опыта с замерами по времени, замер для каждой конфигурации был проведён по 10 раз, конечное время – среднее для этих 5 замеров.

Набор свойств материала для каждого замера:

- 1 — без эффектов;
- 2 — эффект отражения;
- 3 — эффект преломления;
- 4 — эффект преломления и отражения.

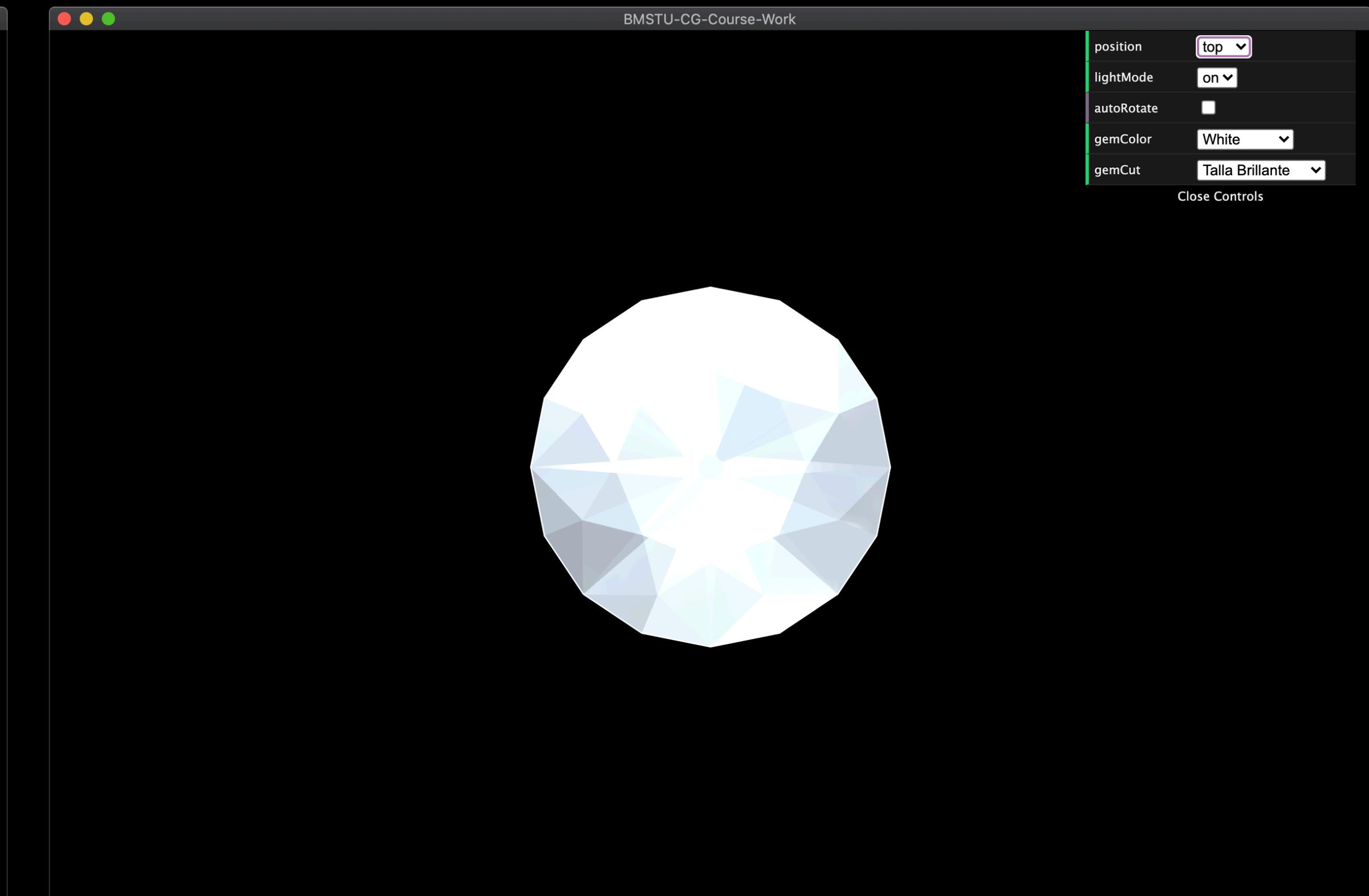
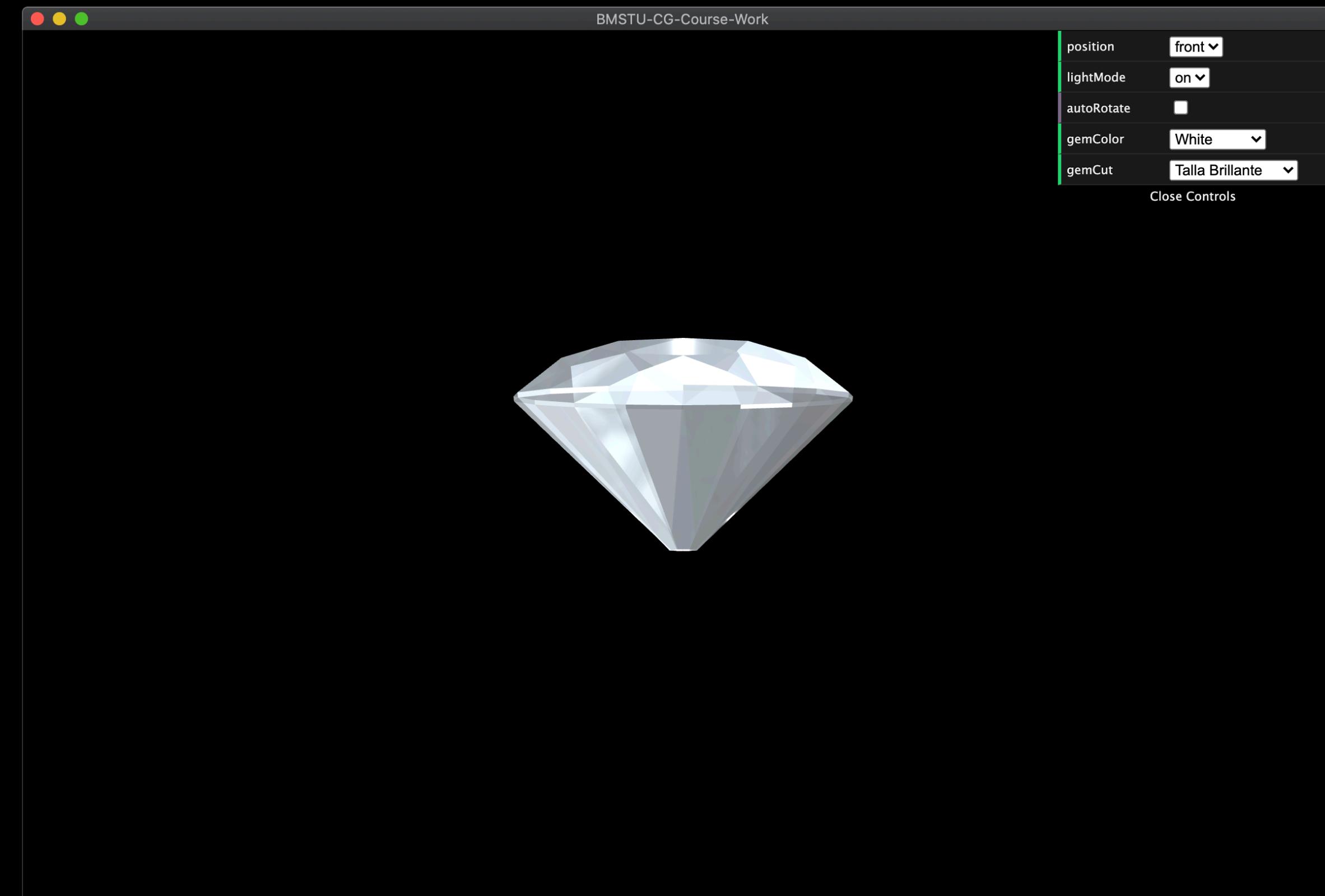
Результаты эксперимента

	№ замера	1	2	3	4	5	Среднее время
№ набора							
1		4.4 с	4.6 с	4.3 с	4.4 с	4.5 с	4.4 с
2		5.0 с	4.7 с	5.4 с	5.1 с	4.9 с	5.0 с
3		5.5 с	5.2 с	5.1 с	5.7 с	5.5 с	5.4 с
4		11.3 с	11.1 с	11.2 с	11.0 с	11.1 с	11.1 с

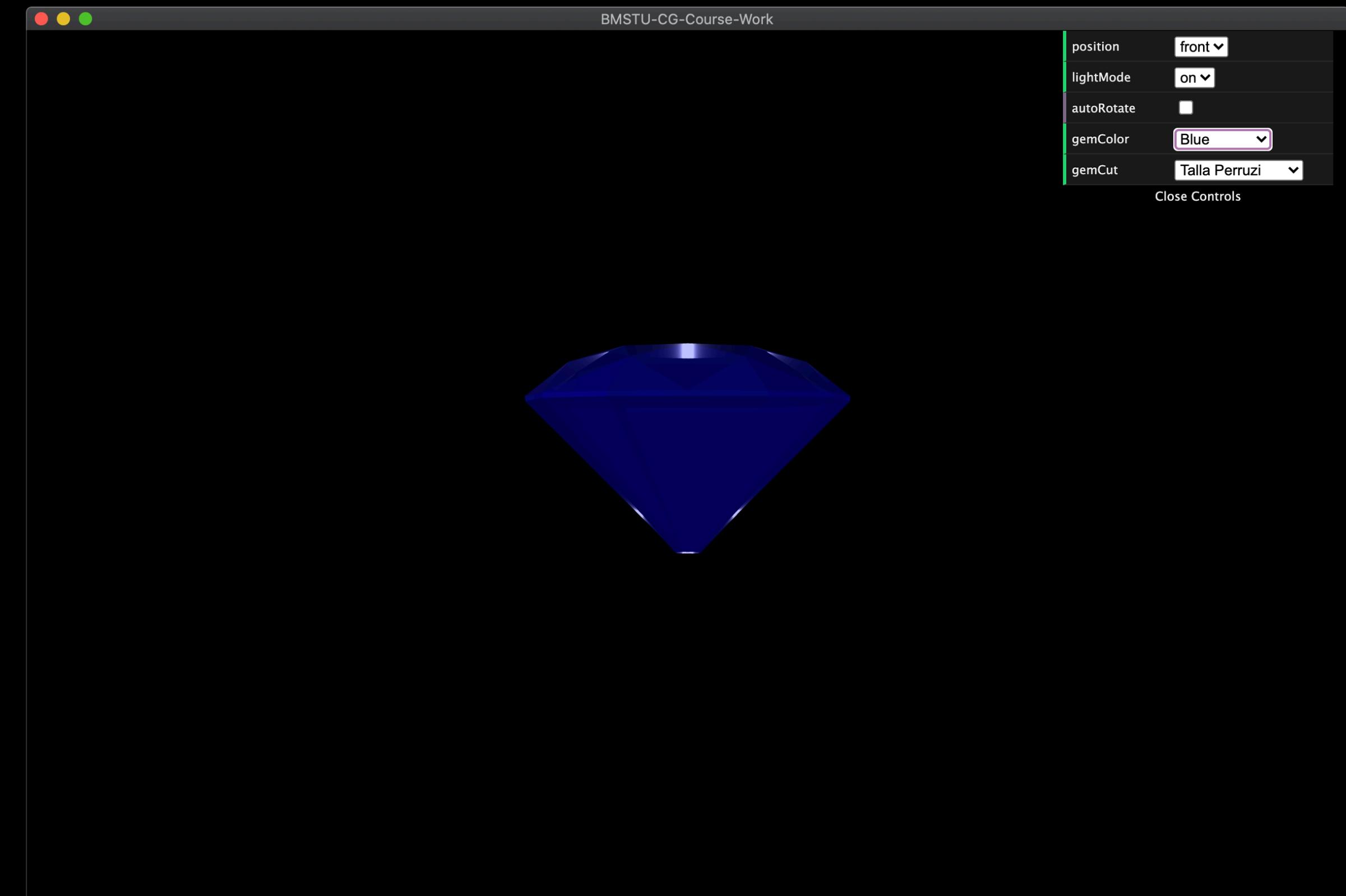
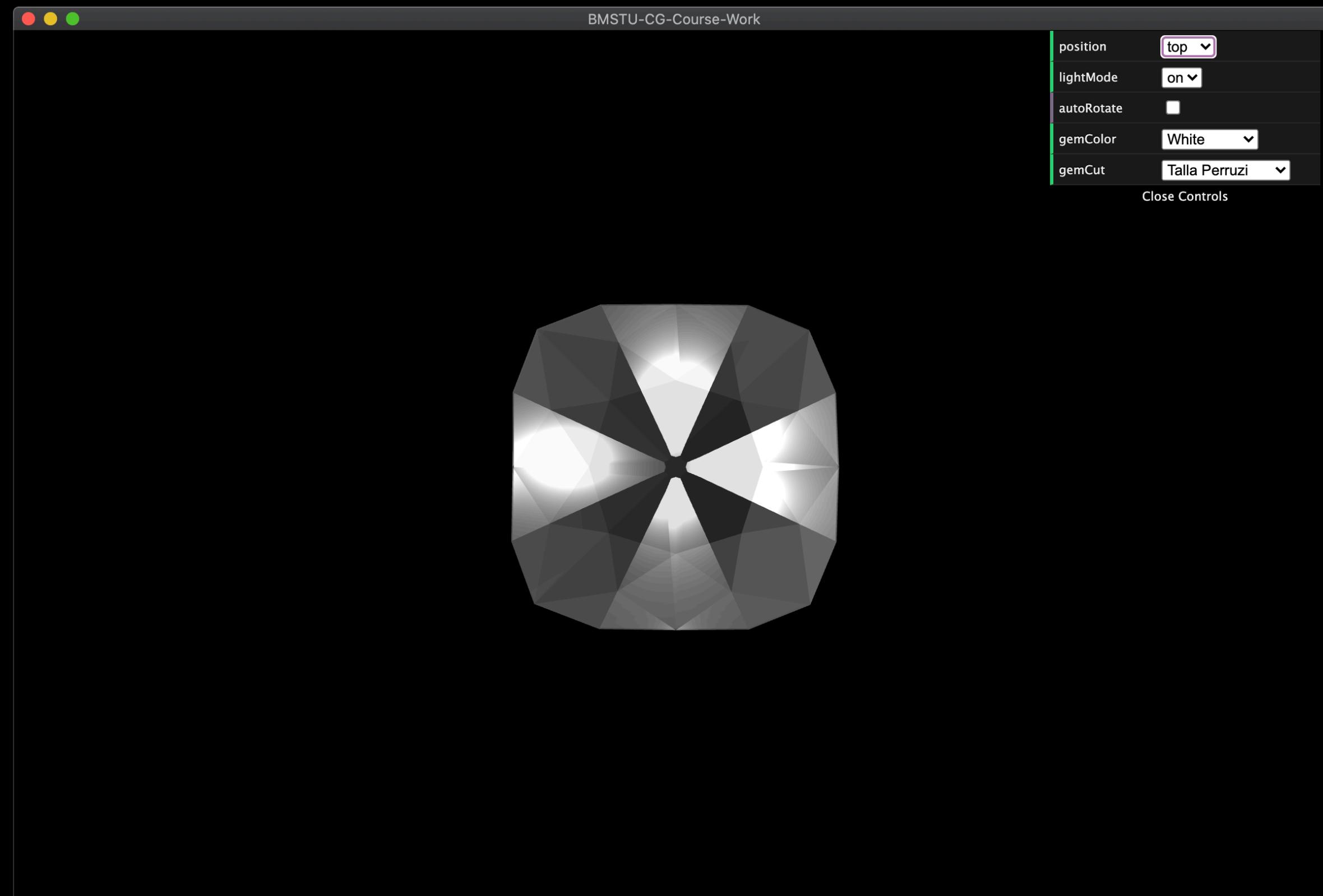
Вывод из результата исследования

Из результата эксперимента следует, что использование обоих эффектов (преломления и отражения), замедляет генерацию кадра примерно в 2,5 раза. Тем самым, опыт показывает, что наложение немногих дополнительных условий и небольших добавок оказывается на времени выполнения задач, что является логичным, так как производится больше расчетов. Но нужно учесть, что основное время алгоритм все-таки тратит именно на просчет пересечений лучей с объектами, поэтому именно здесь нужна модернизация.

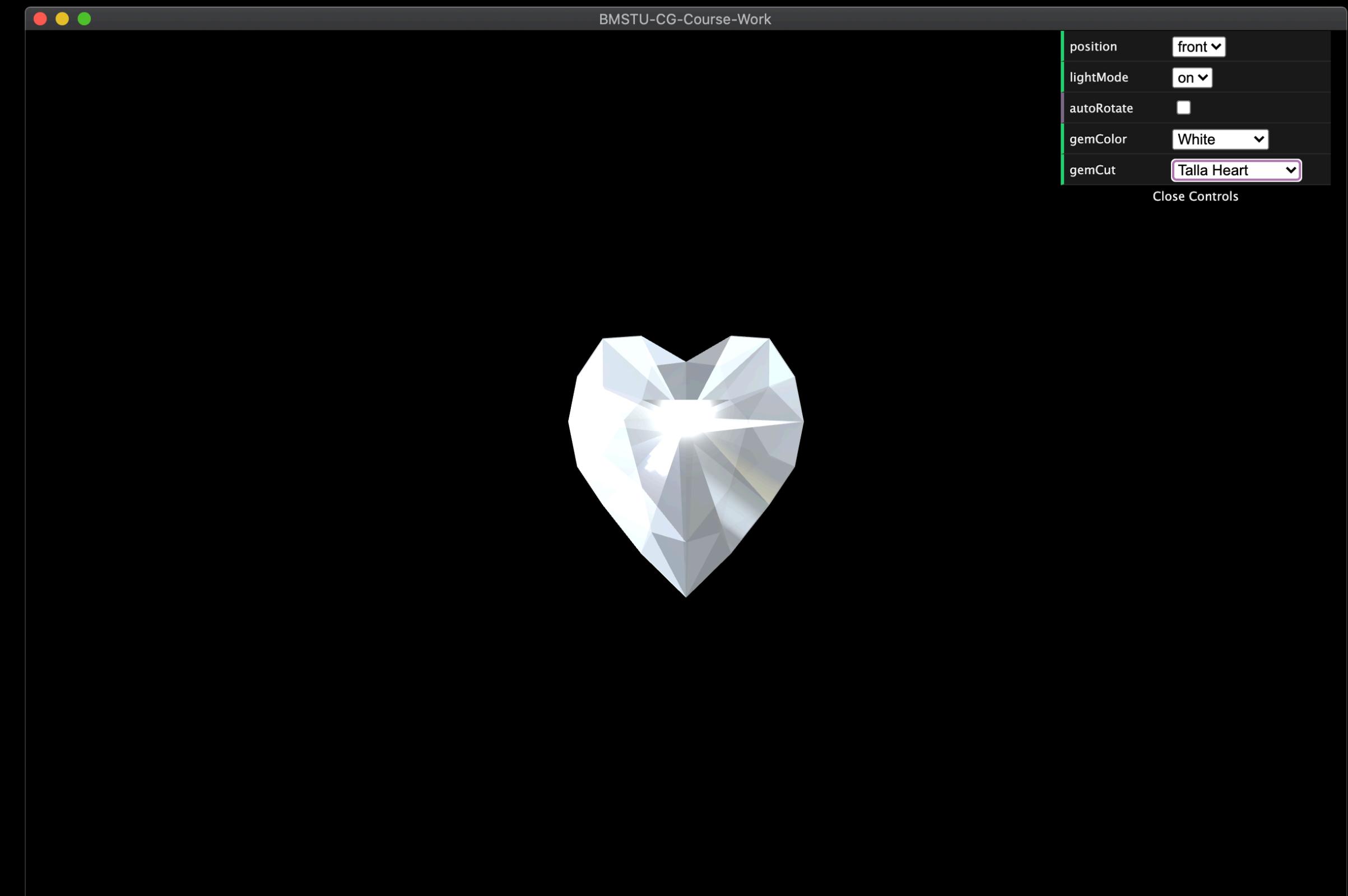
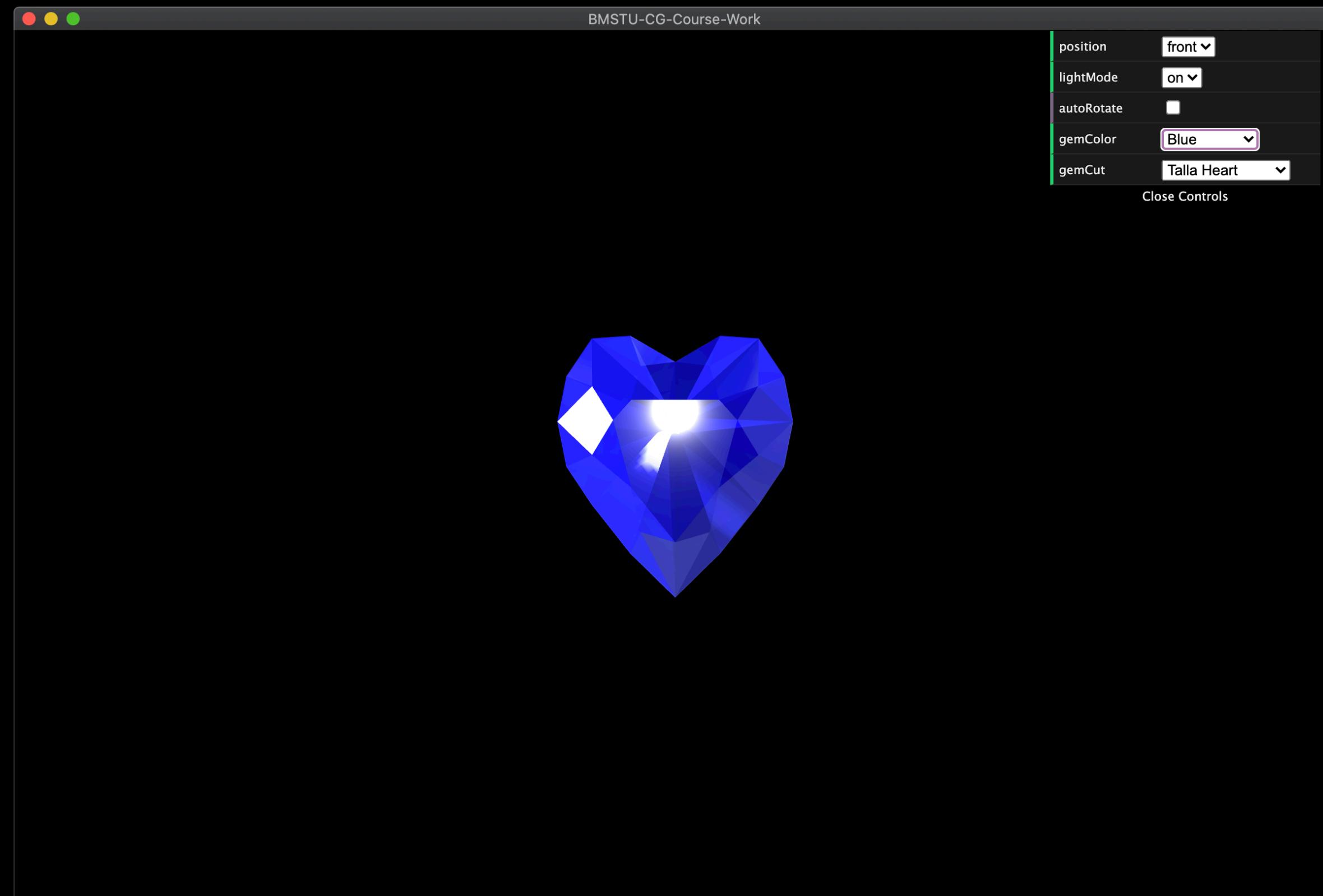
Демонстрация работы программы



Демонстрация работы программы



Демонстрация работы программы



Демонстрация работы программы

