Компьютерная графика

Лекция 8: Геометрические шейдеры, shadow volumes, shadow mapping и его разновидности

2025

Геометрические шейдеры

- Тип шейдера, наравне в вершинным и фрагментным

Геометрические шейдеры

- Тип шейдера, наравне в вершинным и фрагментным
- Создаётся как `glCreateShader(GL_GEOMETRY_SHADER)`

Геометрические шейдеры

- Тип шейдера, наравне в вершинным и фрагментным
- Создаётся как `glCreateShader(GL_GEOMETRY_SHADER)`
- Встраивается после вершинного шейдера, до perspective divide

Геометрические шейдеры

- Тип шейдера, наравне в вершинным и фрагментным
- Создаётся как `glCreateShader(GL_GEOMETRY_SHADER)`
- Встраивается после вершинного шейдера, до perspective divide
- Оперирует целыми примитивами (точками/линиями/треугольниками), т.е. наборами вершин

Геометрические шейдеры

- Тип шейдера, наравне в вершинным и фрагментным
- Создаётся как `glCreateShader(GL_GEOMETRY_SHADER)`
- Встраивается после вершинного шейдера, до perspective divide
- Оперирует целыми примитивами (точками/линиями/треугольниками), т.е. наборами вершин
- Может на лету менять тип примитива и количество вершин

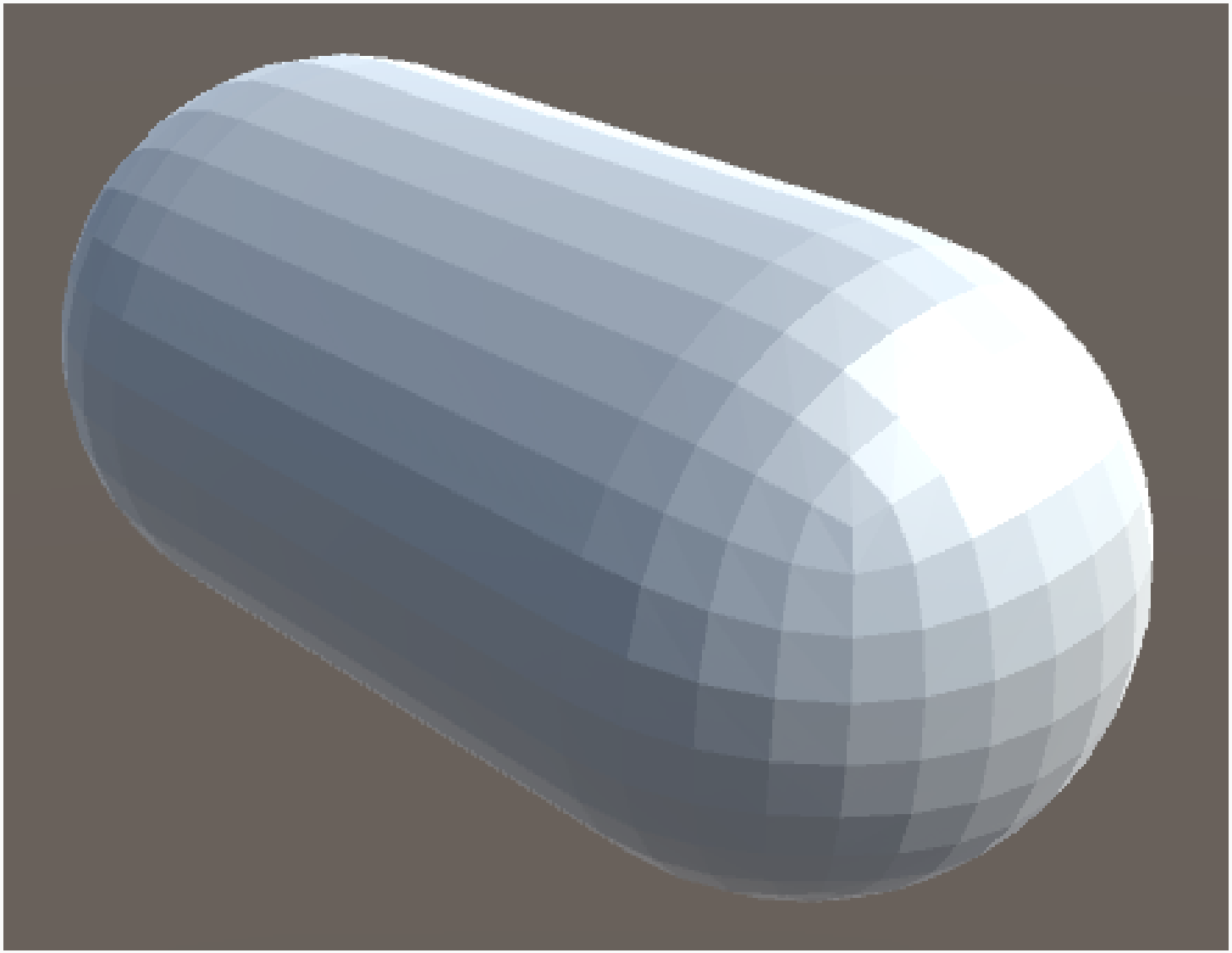
Геометрические шейдеры

- Тип шейдера, наравне в вершинным и фрагментным
- Создаётся как `glCreateShader(GL_GEOMETRY_SHADER)`
- Встраивается после вершинного шейдера, до perspective divide
- Оперирует целыми примитивами (точками/линиями/треугольниками), т.е. наборами вершин
- Может на лету менять тип примитива и количество вершин
- $\Longrightarrow$ Может работать довольно медленно

Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading’a

Flat shading



Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading’a

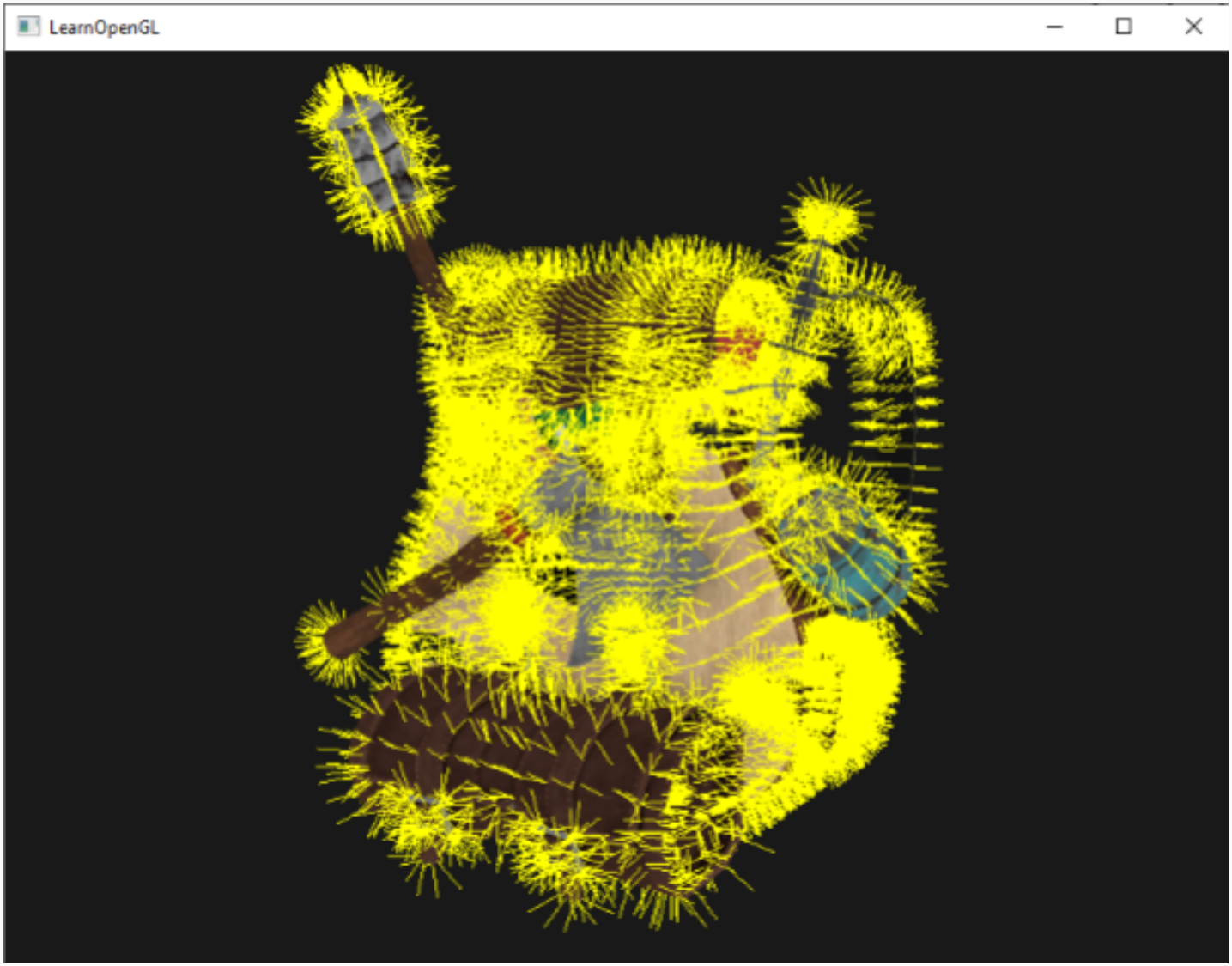
Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading’a
  - Вход: треугольник (тройка вершин)
  - Выход: те же вершины с посчитанной нормалью

Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading'a
  - Вход: треугольник (тройка вершин)
  - Выход: те же вершины с посчитанной нормалью
- Визуализация нормалей

Визуализация нормалей



Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading'a
  - Вход: треугольник (тройка вершин)
  - Выход: те же вершины с посчитанной нормалью
- Визуализация нормалей

Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading'a
  - Вход: треугольник (тройка вершин)
  - Выход: те же вершины с посчитанной нормалью
- Визуализация нормалей
  - Вход: вершина с нормалью
  - Выход: линия из двух вершин – исходная вершина, исходная вершина + нормаль

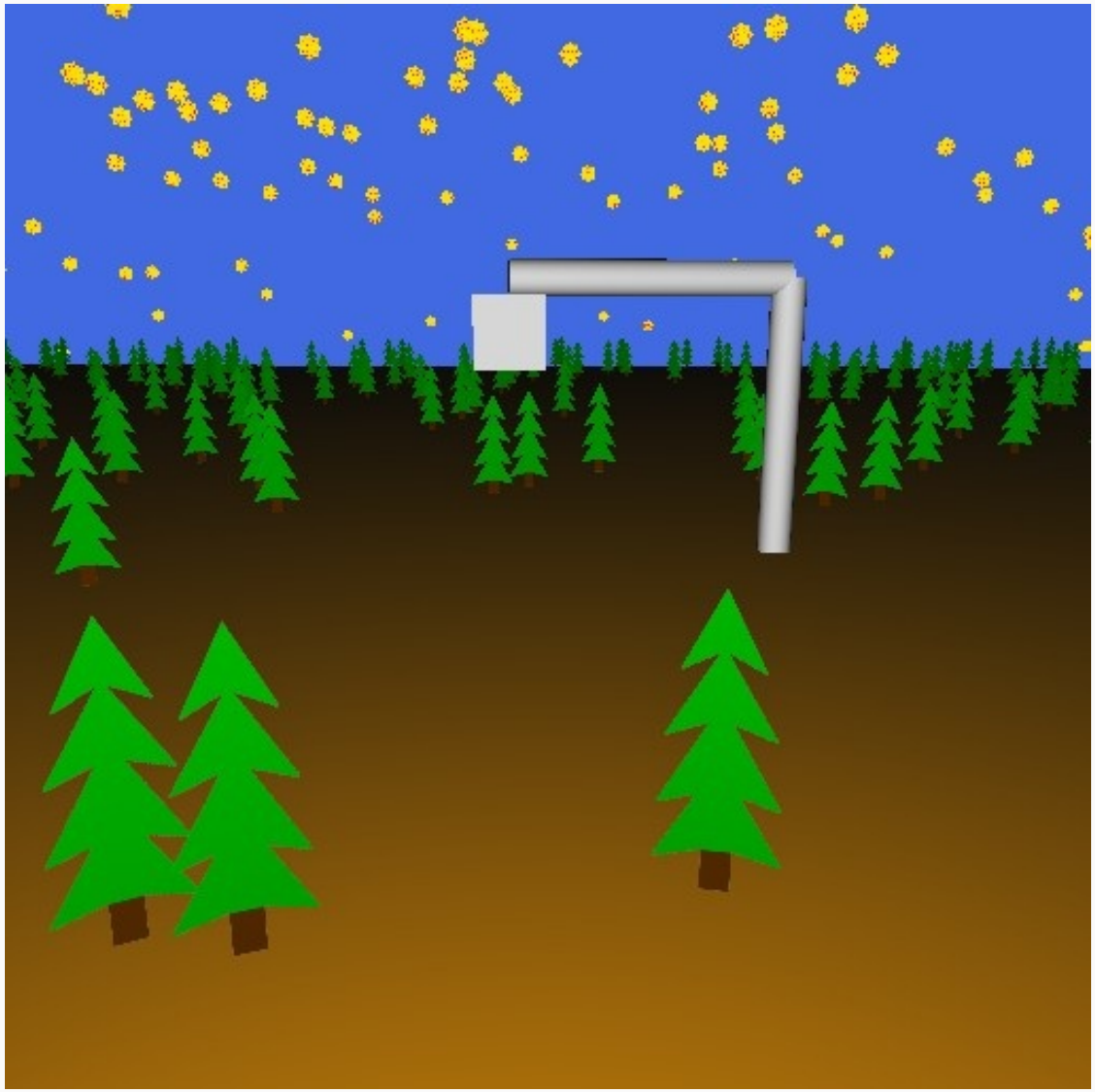
Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading'a
  - Вход: треугольник (тройка вершин)
  - Выход: те же вершины с посчитанной нормалью
- Визуализация нормалей
  - Вход: вершина с нормалью
  - Выход: линия из двух вершин – исходная вершина, исходная вершина + нормаль
- Shadow volumes – алгоритм рисования теней

Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading'a
  - Вход: треугольник (тройка вершин)
  - Выход: те же вершины с посчитанной нормалью
- Визуализация нормалей
  - Вход: вершина с нормалью
  - Выход: линия из двух вершин – исходная вершина, исходная вершина + нормаль
- Shadow volumes – алгоритм рисования теней
- Billboards – плоские фигуры, всегда смотрящие в сторону камеры

Billboards



Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading'a
  - Вход: треугольник (тройка вершин)
  - Выход: те же вершины с посчитанной нормалью
- Визуализация нормалей
  - Вход: вершина с нормалью
  - Выход: линия из двух вершин – исходная вершина, исходная вершина + нормаль
- Shadow volumes – алгоритм рисования теней
- Billboards – плоские фигуры, всегда смотрящие в сторону камеры

Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading'a
  - Вход: треугольник (тройка вершин)
  - Выход: те же вершины с посчитанной нормалью
- Визуализация нормалей
  - Вход: вершина с нормалью
  - Выход: линия из двух вершин – исходная вершина, исходная вершина + нормаль
- Shadow volumes – алгоритм рисования теней
- Billboards – плоские фигуры, всегда смотрящие в сторону камеры
  - Вход: одна вершина (точка)
  - Выход: набор треугольников

Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading'a
  - Вход: треугольник (тройка вершин)
  - Выход: те же вершины с посчитанной нормалью
- Визуализация нормалей
  - Вход: вершина с нормалью
  - Выход: линия из двух вершин – исходная вершина, исходная вершина + нормаль
- Shadow volumes – алгоритм рисования теней
- Billboards – плоские фигуры, всегда смотрящие в сторону камеры
  - Вход: одна вершина (точка)
  - Выход: набор треугольников
  - Системы частиц

Billboards: система частиц (дым)

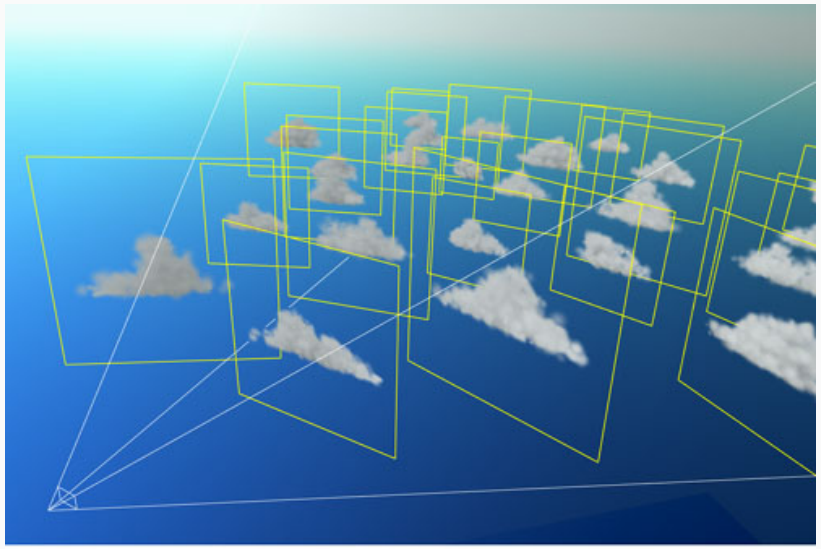
Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading'a
  - Вход: треугольник (тройка вершин)
  - Выход: те же вершины с посчитанной нормалью
- Визуализация нормалей
  - Вход: вершина с нормалью
  - Выход: линия из двух вершин – исходная вершина, исходная вершина + нормаль
- Shadow volumes – алгоритм рисования теней
- Billboards – плоские фигуры, всегда смотрящие в сторону камеры
  - Вход: одна вершина (точка)
  - Выход: набор треугольников
  - Системы частиц

Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading'a
  - Вход: треугольник (тройка вершин)
  - Выход: те же вершины с посчитанной нормалью
- Визуализация нормалей
  - Вход: вершина с нормалью
  - Выход: линия из двух вершин – исходная вершина, исходная вершина + нормаль
- Shadow volumes – алгоритм рисования теней
- Billboards – плоские фигуры, всегда смотрящие в сторону камеры
  - Вход: одна вершина (точка)
  - Выход: набор треугольников
  - Системы частиц
  - Облака

Billboards: облака



Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading'a
  - Вход: треугольник (тройка вершин)
  - Выход: те же вершины с посчитанной нормалью
- Визуализация нормалей
  - Вход: вершина с нормалью
  - Выход: линия из двух вершин – исходная вершина, исходная вершина + нормаль
- Shadow volumes – алгоритм рисования теней
- Billboards – плоские фигуры, всегда смотрящие в сторону камеры
  - Вход: одна вершина (точка)
  - Выход: набор треугольников
  - Системы частиц
  - Облака

Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading'a
  - Вход: треугольник (тройка вершин)
  - Выход: те же вершины с посчитанной нормалью
- Визуализация нормалей
  - Вход: вершина с нормалью
  - Выход: линия из двух вершин – исходная вершина, исходная вершина + нормаль
- Shadow volumes – алгоритм рисования теней
- Billboards – плоские фигуры, всегда смотрящие в сторону камеры
  - Вход: одна вершина (точка)
  - Выход: набор треугольников
  - Системы частиц
  - Облака
  - Далёкие деревья

Billboards: деревья

Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading'a
  - Вход: треугольник (тройка вершин)
  - Выход: те же вершины с посчитанной нормалью
- Визуализация нормалей
  - Вход: вершина с нормалью
  - Выход: линия из двух вершин – исходная вершина, исходная вершина + нормаль
- Shadow volumes – алгоритм рисования теней
- Billboards – плоские фигуры, всегда смотрящие в сторону камеры
  - Вход: одна вершина (точка)
  - Выход: набор треугольников
  - Системы частиц
  - Облака
  - Далёкие деревья

Геометрические шейдеры: примеры использования

- Расчёт нормалей для flat shading'а
  - Вход: треугольник (тройка вершин)
  - Выход: те же вершины с посчитанной нормалью
- Визуализация нормалей
  - Вход: вершина с нормалью
  - Выход: линия из двух вершин – исходная вершина, исходная вершина + нормаль
- Shadow volumes – алгоритм рисования теней
- Billboards – плоские фигуры, всегда смотрящие в сторону камеры
  - Вход: одна вершина (точка)
  - Выход: набор треугольников
  - Системы частиц
  - Облака
  - Далёкие деревья
  - Трава

Billboards: трава

Геометрические шейдеры: пример

```
uniform mat4 transform;
// Входные примитивы - точки
layout (points) in;
// Выходные примитивы - линии, в сумме не больше 2х вершин
layout (line_strip, max_vertices = 2) out;
// Данные из вершинного шейдера
in vec3 normal[];

void main() {
    gl_Position = transform * gl_in[0].gl_Position;
    EmitVertex();

    gl_Position = transform * (gl_in[0].gl_Position + vec4(normal[0], 0));
    EmitVertex();

    EndPrimitive();
}
```

Геометрические шейдеры: пример

```
// Входные примитивы - линии
layout (lines) in;
// Выходные примитивы - треугольники, в сумме не больше 4х вершин
layout (triangle_strip, max_vertices = 4) out;
// Данные для фрагментного шейдера
out vec4 color;

void main() {
    gl_Position = gl_in[0].gl_Position + vec4(-1.0, -1.0, 0.0, 0.0);
    color = vec4(1.0, 0.0, 0.0, 1.0);
    EmitVertex();

    gl_Position = gl_in[0].gl_Position + vec4( 1.0, -1.0, 0.0, 0.0);
    color = vec4(0.0, 1.0, 0.0, 1.0);
    EmitVertex();

    gl_Position = gl_in[1].gl_Position + vec4(-1.0,  1.0, 0.0, 0.0);
    color = vec4(0.0, 0.0, 1.0, 1.0);
    EmitVertex();

    gl_Position = gl_in[1].gl_Position + vec4( 1.0,  1.0, 0.0, 0.0);
    color = vec4(1.0, 1.0, 1.0, 1.0);
    EmitVertex();

    EndPrimitive();
}
```

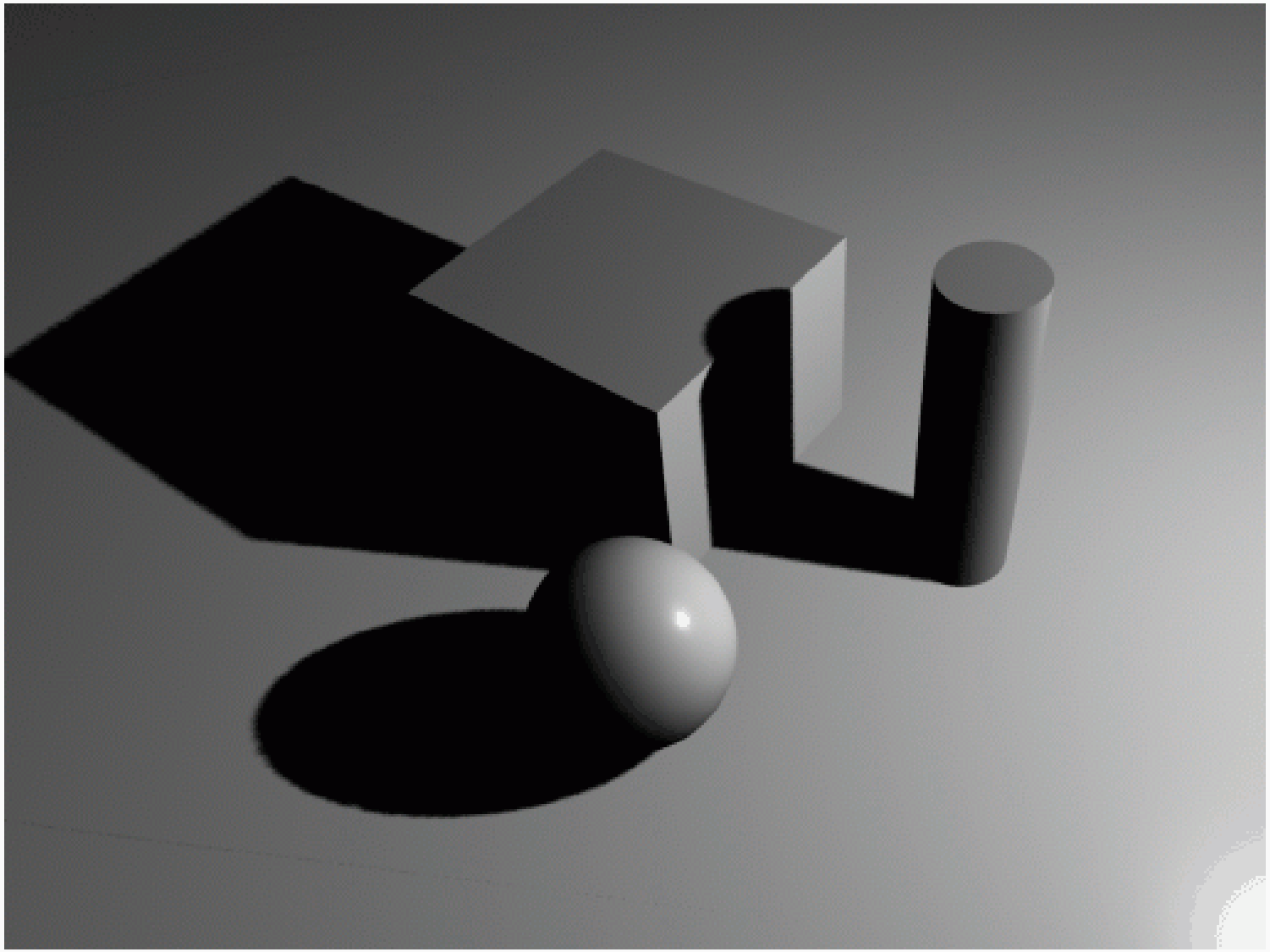
Геометрические шейдеры: ссылки

- khronos.org/opengl/wiki/Geometry_Shader
- learnopengl.com/Advanced-OpenGL/Geometry-Shader
- open.gl/geometry
- lighthouse3d.com/tutorials/glsl-tutorial/geometry-shader
- GPU Gems, Chapter 7. Rendering Countless Blades of Waving Grass

Тени: теория

- Точка сцены, в которую не попадает (заблокирован чем-то) прямой свет из конкретного источника света
- Свойство точки по отношению к конкретному источнику света

Тени



Тени: теория

- Если источник света точечный (или бесконечно удалённый), тень – бинарное свойство: луч из точки сцены в источник света или пересекает что-то (точка в тени), или нет (точка не в тени) $\Longrightarrow$ жёсткие тени (*hard shadows*)

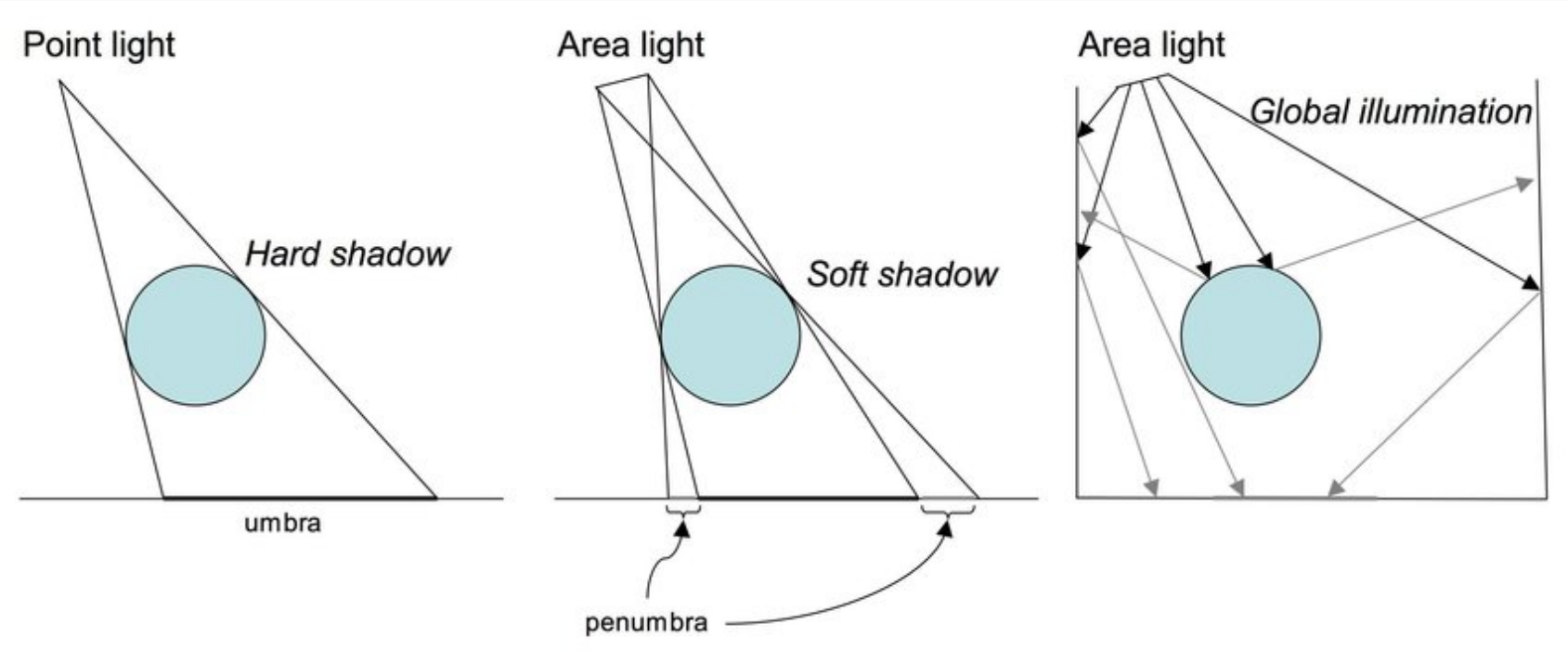
Тени: теория

- Если источник света точечный (или бесконечно удалённый), тень – бинарное свойство: луч из точки сцены в источник света или пересекает что-то (точка в тени), или нет (точка не в тени) $\Longrightarrow$ жёсткие тени (*hard shadows*)
- Если источник света объёмный, точка сцены может находиться в тени относительно части источника света, и не находиться в тени относительно другой его части $\Longrightarrow$ мягкие тени (*soft shadows*)

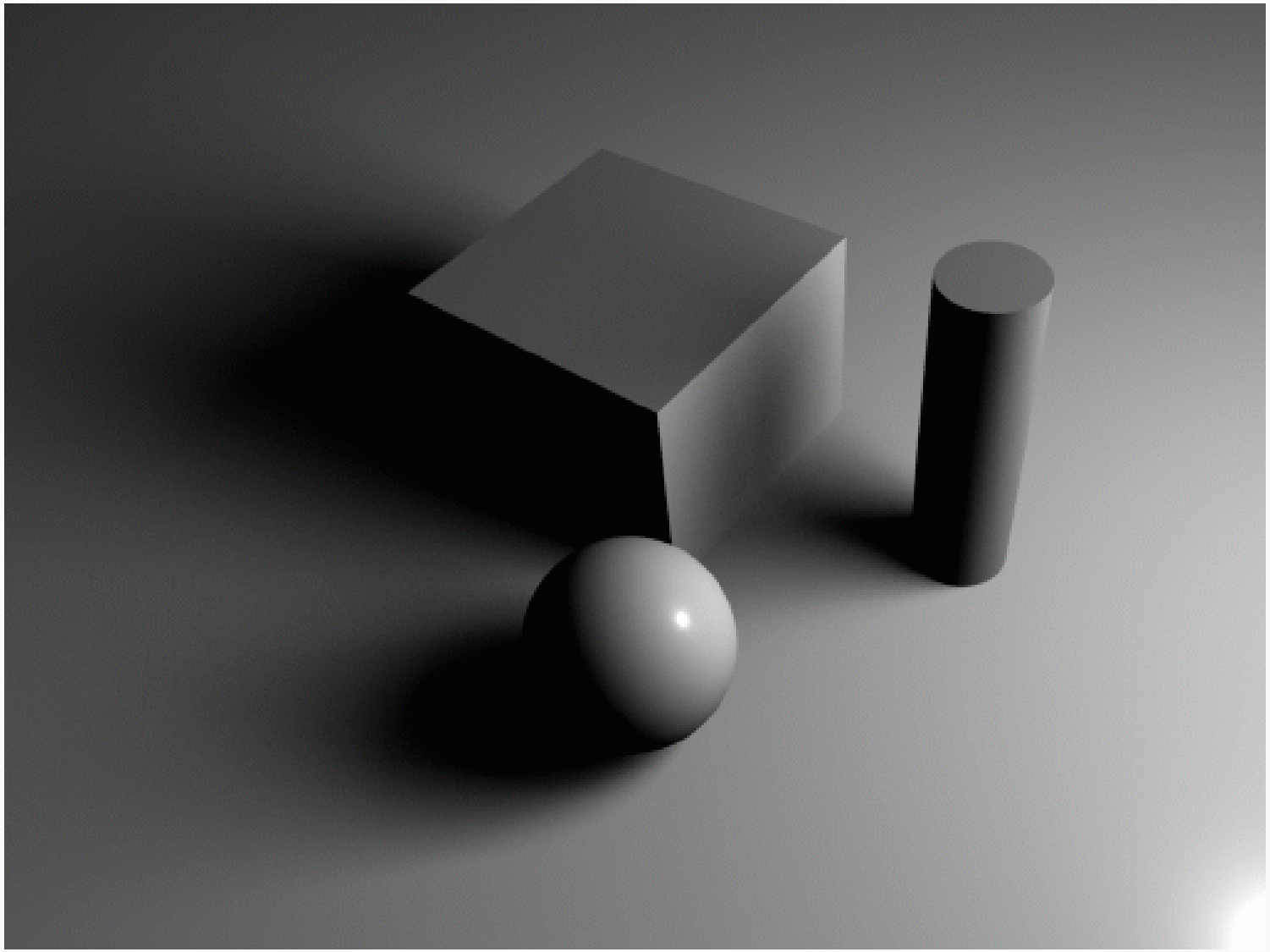
Тени: теория

- Если источник света точечный (или бесконечно удалённый), тень – бинарное свойство: луч из точки сцены в источник света или пересекает что-то (точка в тени), или нет (точка не в тени) $\Longrightarrow$ жёсткие тени (*hard shadows*)
- Если источник света объёмный, точка сцены может находиться в тени относительно части источника света, и не находиться в тени относительно другой его части $\Longrightarrow$ мягкие тени (*soft shadows*)
  - Точки, полностью находящиеся в тени – *umbra*
  - Точки, частично находящиеся в тени – *penumbra* (*полутень*)

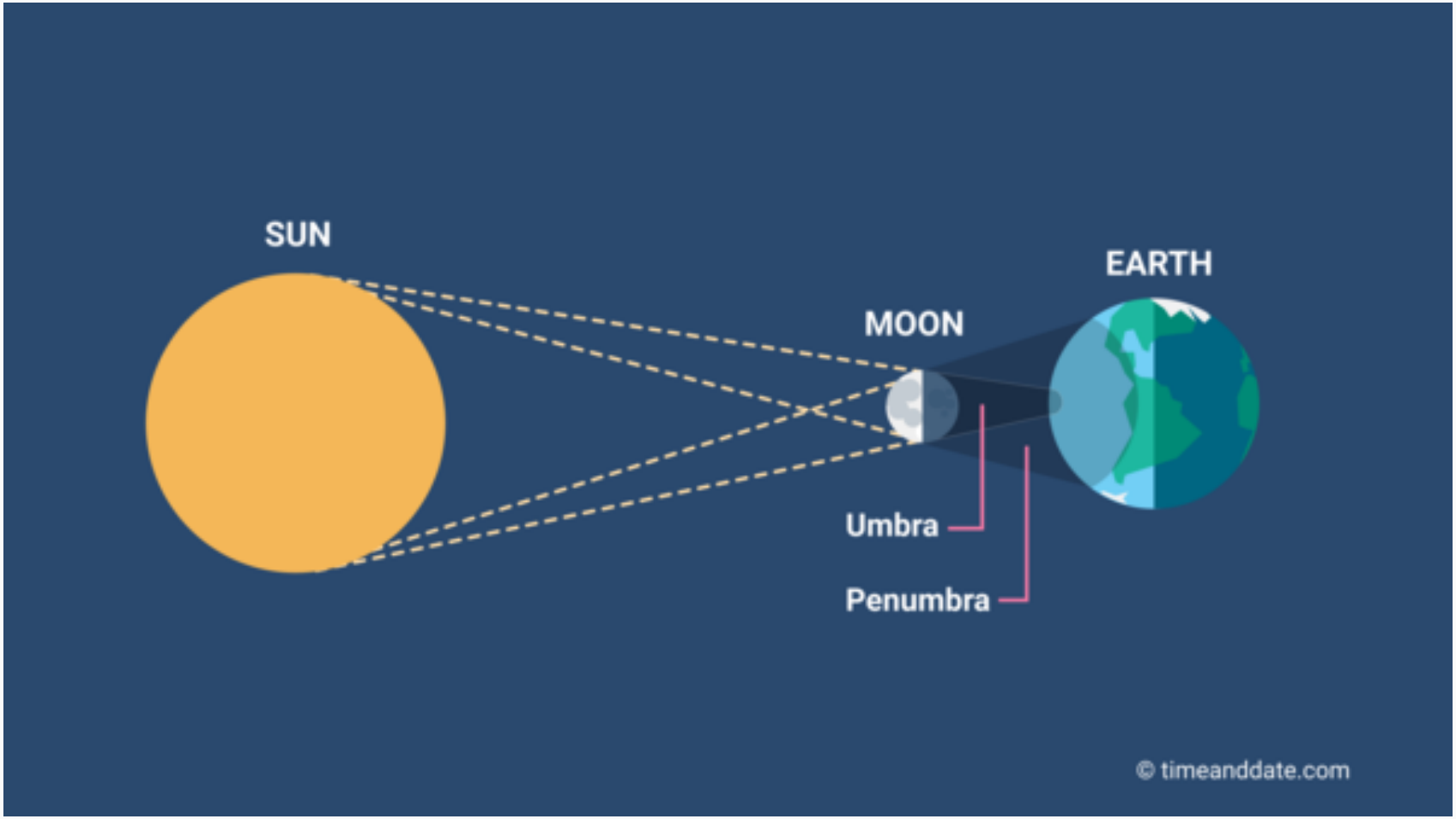
Тени: мягкие vs жёсткие



Мягкие тени



Солнечное затмение



Тени: теория

- Реальные источники света – объёмные

Тени: теория

- Реальные источники света – объёмные
- Размер и форма penumbra зависит от размеров и формы источника света, а также от расстояния до него (чем дальше, тем меньше penumbra)

Тени: теория

- Реальные источники света – объёмные
- Размер и форма penumbra зависит от размеров и формы источника света, а также от расстояния до него (чем дальше, тем меньше penumbra)
  - В пределе расстояния $\to \infty$ мягкая тень вырождается в жёсткую

Тени: теория

- Реальные источники света – объёмные
- Размер и форма penumbra зависит от размеров и формы источника света, а также от расстояния до него (чем дальше, тем меньше penumbra)
  - В пределе расстояния $\to \infty$ мягкая тень вырождается в жёсткую
- В real-time графике получить правильные тени (как жёсткие, так и мягкие) довольно сложно

Тени: raytracing

- При простом raytracing'е (*Whitted-style*, без полного решения rendering equation) для получения жёсткой тени можно послать дополнительный луч в направлении света (shadow ray): если он что-то пересёк, точка находится в тени

Тени: raytracing

- При простом raytracing'е (*Whitted-style*, без полного решения rendering equation) для получения жёсткой тени можно послать дополнительный луч в направлении света (shadow ray): если он что-то пересёк, точка находится в тени
- При raytracing'е с монте-карло интегрированием для global illumination тени (как жёсткие, так и мягкие) получаются автоматически

Тени: real-time алгоритмы

- Shadow volumes

Тени: real-time алгоритмы

- Shadow volumes
  - \+ Идеальные жёсткие тени
  - — Алиасинг
  - — Нужно на лету генерировать геометрию
  - — Сложно сделать мягкие тени
  - — Очень большой fill rate (количество обрабатываемых пикселей), плохо предсказумая производительность

Тени: real-time алгоритмы

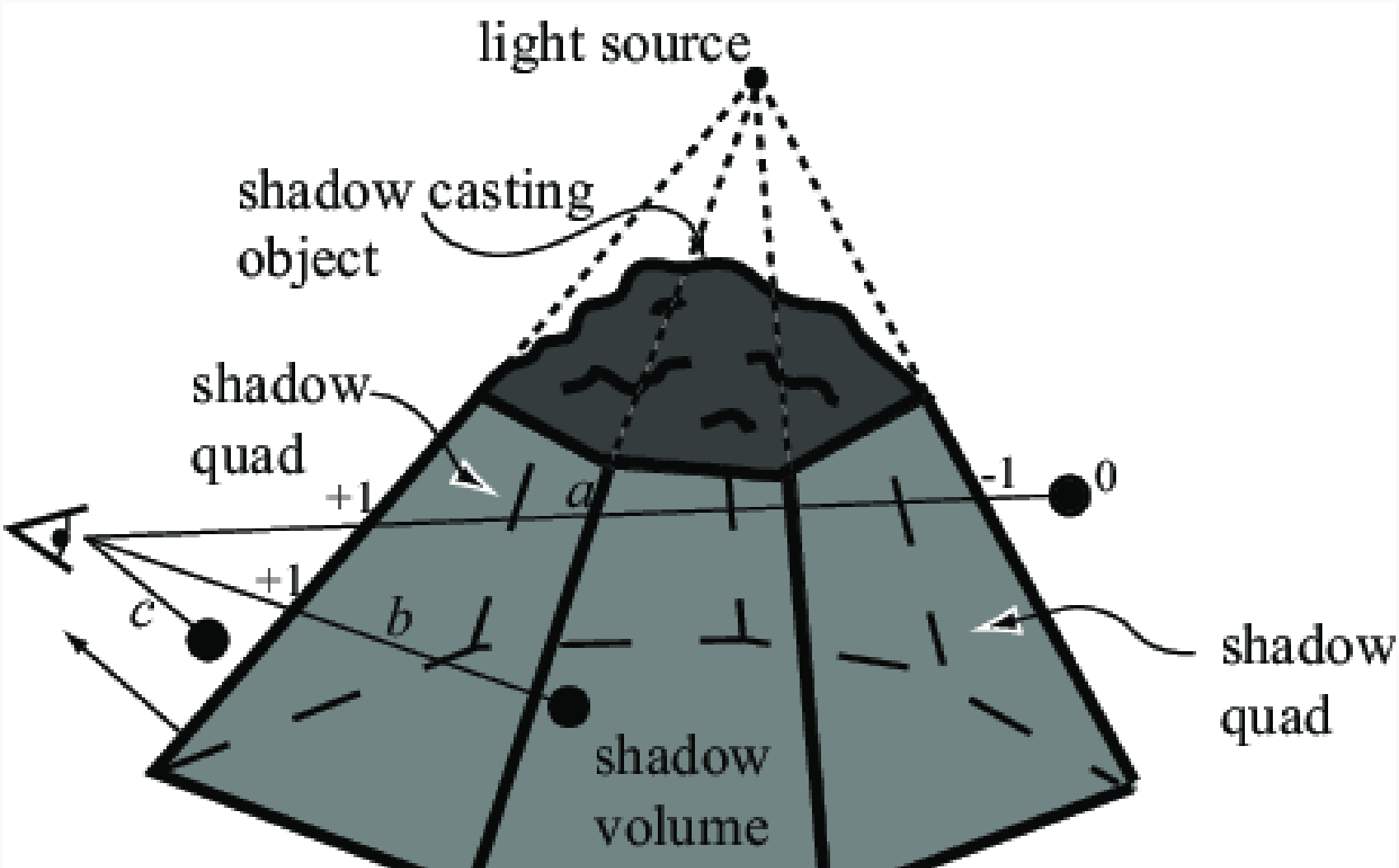
- Shadow volumes
  - \+ Идеальные жёсткие тени
  - — Алиасинг
  - — Нужно на лету генерировать геометрию
  - — Сложно сделать мягкие тени
  - — Очень большой fill rate (количество обрабатываемых пикселей), плохо предсказумая производительность
- Shadow mapping

Тени: real-time алгоритмы

- Shadow volumes
  - \+ Идеальные жёсткие тени
  - — Алиасинг
  - — Нужно на лету генерировать геометрию
  - — Сложно сделать мягкие тени
  - — Очень большой fill rate (количество обрабатываемых пикселей), плохо предсказумая производительность
- Shadow mapping
  - \+ Производительность растёт +/- линейно с ростом сложности сцены
  - — Крупный алиасинг (”пиксельные”тени)
  - \+ Много вариаций, улучшающих качество и позволяющих делать как жёсткие, так и мягкие тени

Shadow volumes (они же stencil shadows)

- Тень от конкретного объекта – некая (полубесконечная) трёхмерная область пространства (shadow volume)



Shadow volumes (они же stencil shadows)

- Тень от конкретного объекта – некая (полубесконечная) трёхмерная область пространства (shadow volume)

Shadow volumes (они же stencil shadows)

- Тень от конкретного объекта – некая (полубесконечная) трёхмерная область пространства (shadow volume)
- Нарисуем её как трёхмерный объект (построим и нарисуем её грани)

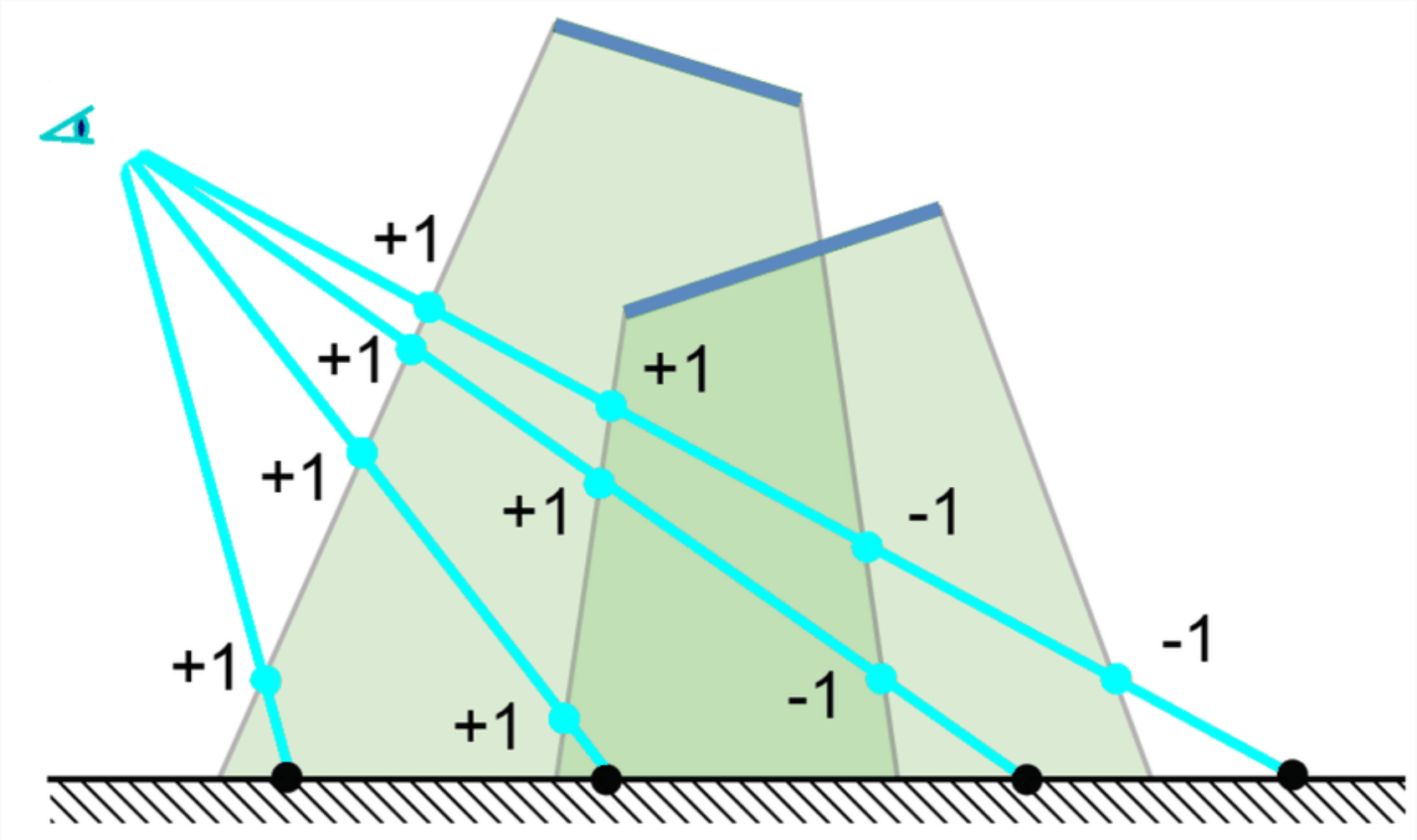
Shadow volumes (они же stencil shadows)

- Тень от конкретного объекта – некая (полубесконечная) трёхмерная область пространства (shadow volume)
- Нарисуем её как трёхмерный объект (построим и нарисуем её грани)
- Если в конкретный пиксель попало одинаковое количество front-facing и back-facing граней, то он не в тени, иначе – в тени

Shadow volumes (они же stencil shadows)

- Тень от конкретного объекта – некая (полубесконечная) трёхмерная область пространства (shadow volume)
- Нарисуем её как трёхмерный объект (построим и нарисуем её грани)
- Если в конкретный пиксель попало одинаковое количество front-facing и back-facing граней, то он не в тени, иначе – в тени
- Количество пересечений луча из камеры с гранями shadow volume вычисляем с помощью stencil буфера

Shadow volumes (они же stencil shadows)



Shadow volumes: алгоритм

- Выключаем рисование в цветовой буфер и буфер глубины (`glColorMask`, `glDepthMask`) (но не выключаем тест глубины!)

Shadow volumes: алгоритм

- Выключаем рисование в цветовой буфер и буфер глубины (`glColorMask`, `glDepthMask`) (но не выключаем тест глубины!)
- Настраиваем stencil буфер: `+1` для front-facing треугольников, `-1` для back-facing

Shadow volumes: алгоритм

- Выключаем рисование в цветовой буфер и буфер глубины (`glColorMask`, `glDepthMask`) (но не выключаем тест глубины!)
- Настраиваем stencil буфер: `+1` для front-facing треугольников, `-1` для back-facing
- Вычисляем и рисуем shadow volume для каждого объекта

Shadow volumes: алгоритм

- Выключаем рисование в цветовой буфер и буфер глубины (`glColorMask`, `glDepthMask`) (но не выключаем тест глубины!)
- Настраиваем stencil буфер: `+1` для front-facing треугольников, `-1` для back-facing
- Вычисляем и рисуем shadow volume для каждого объекта
- Обратно включаем рисование цвета и глубины

Shadow volumes: алгоритм

- Выключаем рисование в цветовой буфер и буфер глубины (`glColorMask`, `glDepthMask`) (но не выключаем тест глубины!)
- Настраиваем stencil буфер: `+1` для front-facing треугольников, `-1` для back-facing
- Вычисляем и рисуем shadow volume для каждого объекта
- Обратно включаем рисование цвета и глубины
- Настраиваем stencil-тест так, чтобы рисовать только пиксели, в которых `stencil == 0`, и рисуем сцену шейдером, вычисляющим освещение

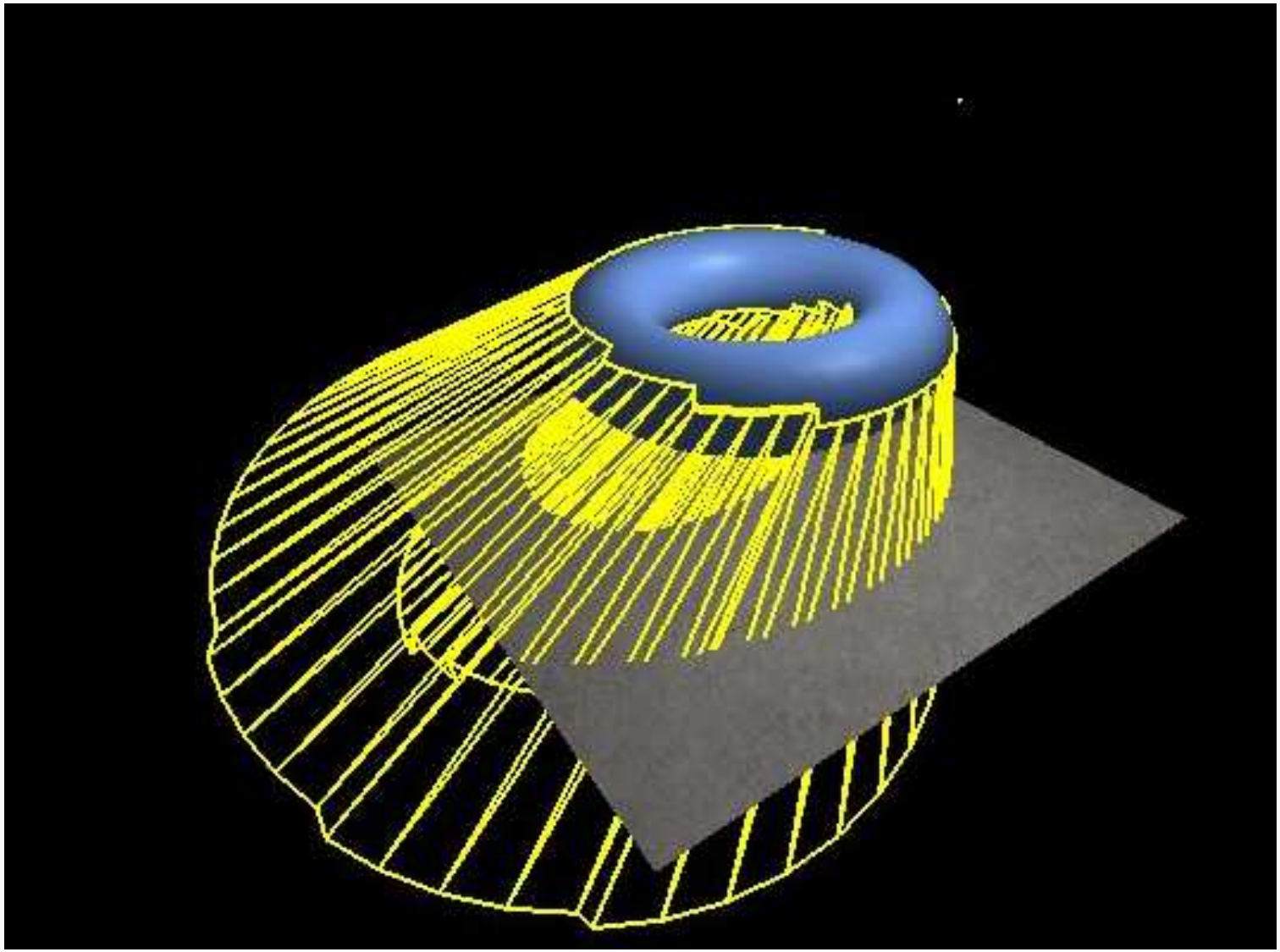
Shadow volumes: алгоритм

- Выключаем рисование в цветовой буфер и буфер глубины (`glColorMask`, `glDepthMask`) (но не выключаем тест глубины!)
- Настраиваем stencil буфер: `+1` для front-facing треугольников, `-1` для back-facing
- Вычисляем и рисуем shadow volume для каждого объекта
- Обратно включаем рисование цвета и глубины
- Настраиваем stencil-тест так, чтобы рисовать только пиксели, в которых `stencil == 0`, и рисуем сцену шейдером, вычисляющим освещение
- Настраиваем stencil-тест так, чтобы рисовать только пиксели, в которых `stencil != 0`, и рисуем сцену шейдером, игнорирующим освещение

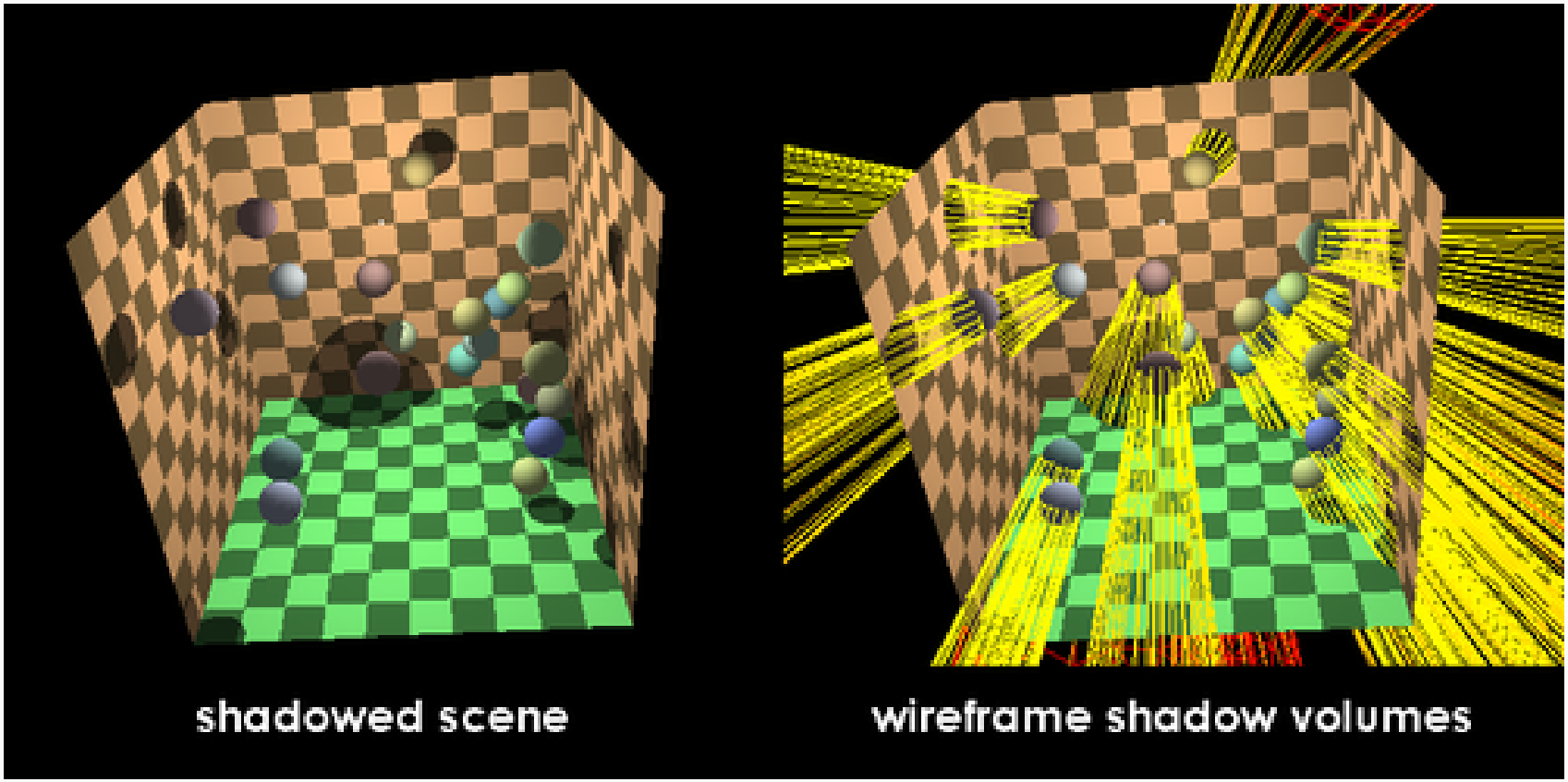
Shadow volumes: алгоритм

- Выключаем рисование в цветовой буфер и буфер глубины (`glColorMask`, `glDepthMask`) (но не выключаем тест глубины!)
- Настраиваем stencil буфер: `+1` для front-facing треугольников, `-1` для back-facing
- Вычисляем и рисуем shadow volume для каждого объекта
- Обратно включаем рисование цвета и глубины
- Настраиваем stencil-тест так, чтобы рисовать только пиксели, в которых `stencil == 0`, и рисуем сцену шейдером, вычисляющим освещение
- Настраиваем stencil-тест так, чтобы рисовать только пиксели, в которых `stencil != 0`, и рисуем сцену шейдером, игнорирующим освещение
- Повторяем для каждого источника света

Shadow volume



Shadow volume



Shadow volumes (Doom 3)

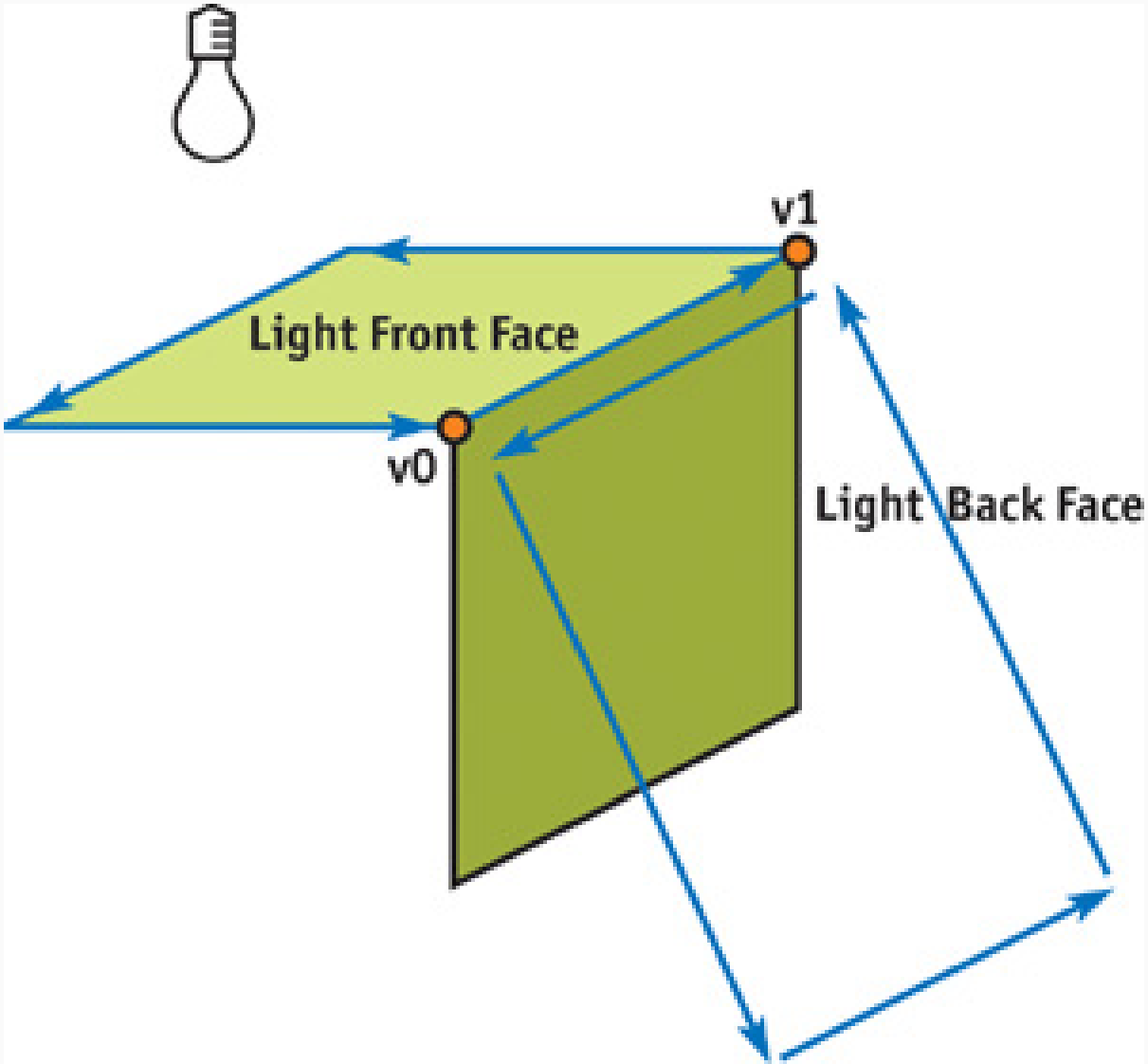
Shadow volumes: как вычислять shadow volume?

- Шаг 1: определить shadow edges – рёбра модели, у которых один соседний треугольник обращён к источнику света $\left(\vec{n} \cdot \vec{r} > 0\right)$, а второй – против источника света $\left(\vec{n} \cdot \vec{r} \leq 0\right)$

Shadow volumes: как вычислять shadow volume?

- Шаг 1: определить shadow edges – рёбра модели, у которых один соседний треугольник обращён к источнику света $\left(\vec{n} \cdot \vec{r} > 0\right)$, а второй – против источника света $\left(\vec{n} \cdot \vec{r} \leq 0\right)$
- Шаг 2: для каждого shadow edge построить четырёхугольную грань shadow volume – к точкам ребра p_1, p_2 добавлются точки $p_1 + D \cdot \frac{p_1 - o}{|p_1 - o|}$ и аналогично для p_2
  - o – координаты источника света
  - D – расстояние, до которого отбрасывается тень (в идеале мы хотим $D \to \infty$, для этого можно воспользоваться однородными координатами)

Shadow volumes (Doom 3)



Shadow volumes: как вычислять shadow volume?

- Два варианта: на CPU или на GPU

Shadow volumes: как вычислять shadow volume?

- Два варианта: на CPU или на GPU
- На CPU: очень дорого (положение модели и источника света могут меняться каждый кадр)

Shadow volumes: как вычислять shadow volume?

- Два варианта: на CPU или на GPU
- На CPU: очень дорого (положение модели и источника света могут меняться каждый кадр)
- На GPU: геометрические шейдеры!
  - Нужен входной тип примитива *lines adjacency*, позволяющий передать 4 вершины как один примитив (две вершины ребра + две вершины соседних треугольников)

Shadow volumes: как вычислять shadow volume?

- Два варианта: на CPU или на GPU
- На CPU: очень дорого (положение модели и источника света могут меняться каждый кадр)
- На GPU: геометрические шейдеры!
  - Нужен входной тип примитива *lines adjacency*, позволяющий передать 4 вершины как один примитив (две вершины ребра + две вершины соседних треугольников)
  - $\Longrightarrow$ Модель должна быть специально адаптирована для генерации shadow volume

Shadow volumes: как вычислять shadow volume?

- Два варианта: на CPU или на GPU
- На CPU: очень дорого (положение модели и источника света могут меняться каждый кадр)
- На GPU: геометрические шейдеры!
  - Нужен входной тип примитива *lines adjacency*, позволяющий передать 4 вершины как один примитив (две вершины ребра + две вершины соседних треугольников)
  - $\Longrightarrow$ Модель должна быть специально адаптирована для генерации shadow volume
  - Шейдер проверяет, является ли ребро shadow edge, и генерирует грань shadow volume

Shadow volumes

- \+ Pixel-perfect жёсткие тени
- — Алиасинг
- — Сложно получить мягкие тени
- — Нужно на лету генерировать геометрию
- — Требует правильной входной геометрии (без дырок и дублирования)
- — Не работает, если камера находится внутри тени (исправляется с помощью т.н. Carmack's Reverse)
- — Ресурсозатратен: даже для маленького объекта его shadow volume может занимать значительную часть сцены $\Longrightarrow$ слишком много растеризации, чтения/записи памяти (stencil buffer)

Shadow volumes с плохой геометрией

Shadow volumes

- Thief 3
- Doom 3
- Quake 4
- Prey
- Far Cry
- F.E.A.R 1, 2, 3
- S.T.A.L.K.E.R.
- Timeshift
- и др.

Shadow volumes: ссылки

- en.wikipedia.org/wiki/Shadow_volume
- ogldev.org/www/tutorial40/tutorial40.html
- GPU Gems, Chapter 9. Efficient Shadow Volume Rendering

Shadow mapping: идея

- Самое популярное семейство алгоритмов рисования теней

Shadow mapping: идея

- Самое популярное семейство алгоритмов рисования теней
- Идея: представим, что источник света – это камера (наблюдатель)
- Тень – это то, что *не видит* источник света

Shadow mapping: идея

- Самое популярное семейство алгоритмов рисования теней
- Идея: представим, что источник света – это камера (наблюдатель)
- Тень – это то, что *не видит* источник света
- Как понять, что видит источник света?

Shadow mapping: идея

- Самое популярное семейство алгоритмов рисования теней
- Идея: представим, что источник света – это камера (наблюдатель)
- Тень – это то, что *не видит* источник света
- Как понять, что видит источник света? Нарисовать!

Shadow mapping: алгоритм

- Рисуем сцену в текстуру (*shadow map*, карта теней) с точки зрения источника света (цветовой буфер не нужен, достаточно буфера глубины)

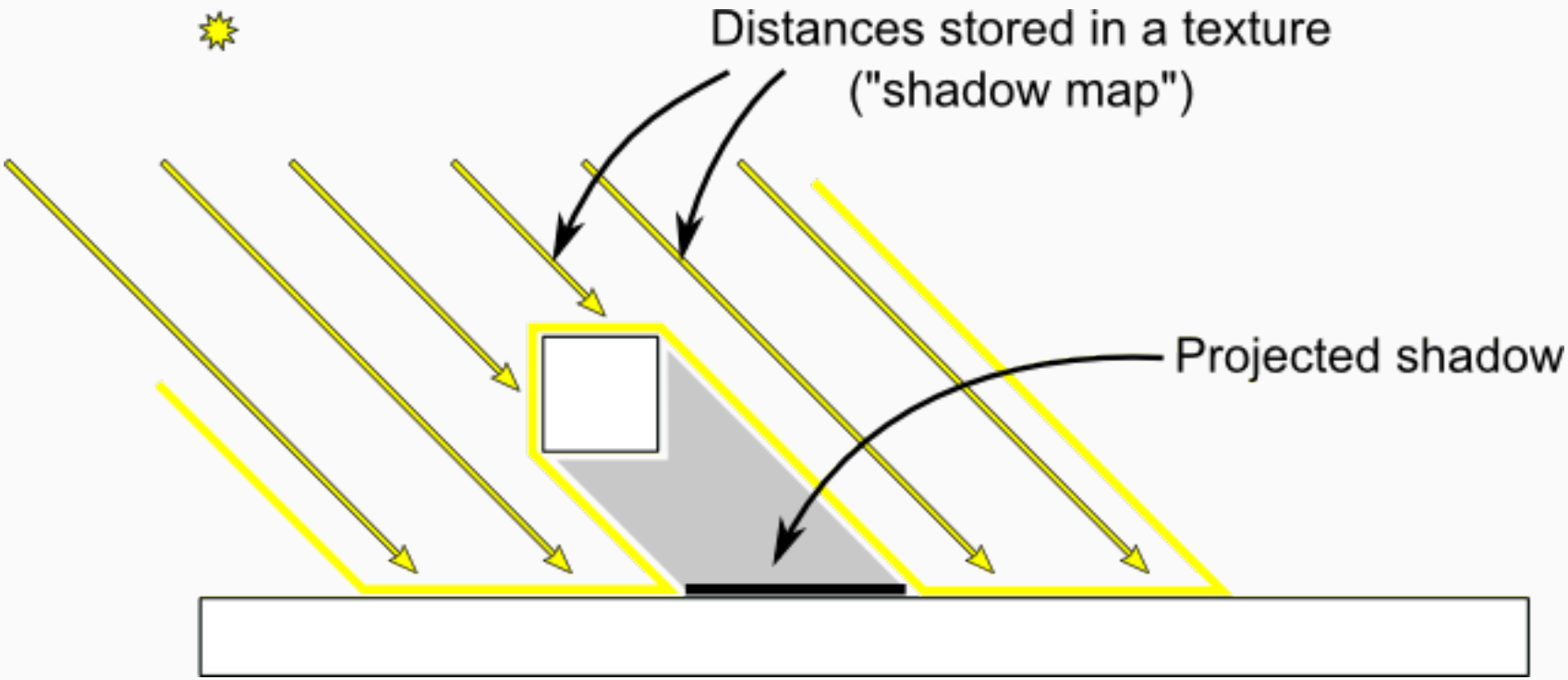
Shadow mapping: алгоритм

- Рисуем сцену в текстуру (*shadow map*, карта теней) с точки зрения источника света (цветовой буфер не нужен, достаточно буфера глубины)
- Рисуем сцену на экран, фрагментный шейдер читает *буфер глубины* (shadow map), нарисованный с точки зрения источника света – там содержатся расстояния от источника до ближайшей (к источнику) поверхности
- Если расстояние от источника до рисуемого пикселя больше, чем значение из буфера глубины, – текущий пиксель находится в тени

Shadow mapping: алгоритм

- Рисуем сцену в текстуру (*shadow map*, карта теней) с точки зрения источника света (цветовой буфер не нужен, достаточно буфера глубины)
- Рисуем сцену на экран, фрагментный шейдер читает *буфер глубины* (shadow map), нарисованный с точки зрения источника света – там содержатся расстояния от источника до ближайшей (к источнику) поверхности
- Если расстояние от источника до рисуемого пикселя больше, чем значение из буфера глубины, – текущий пиксель находится в тени
- N.B. Линейная фильтрация для буфера глубины не имеет смысла – будут артефакты на границах объектов

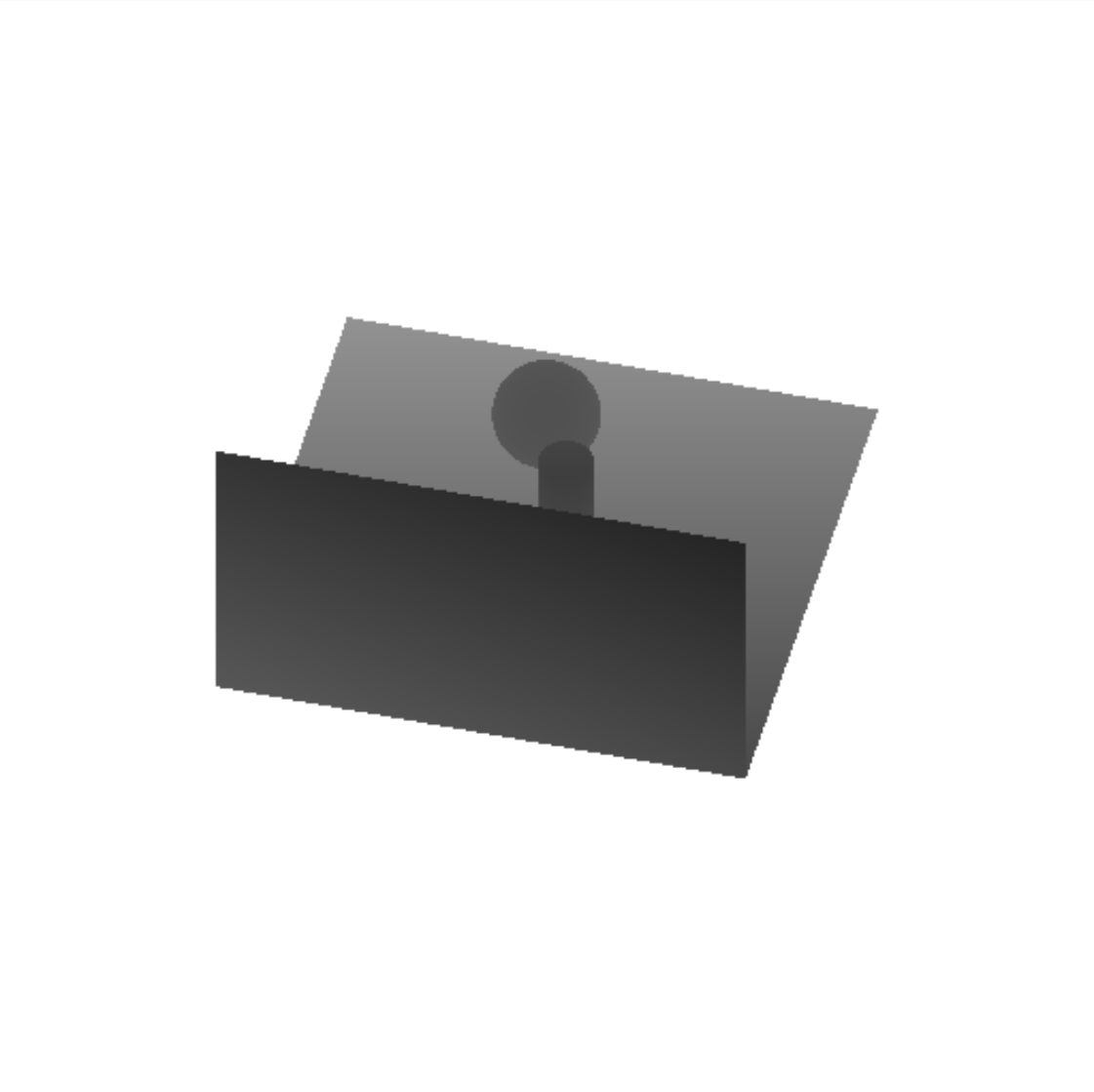
Shadow mapping: алгоритм



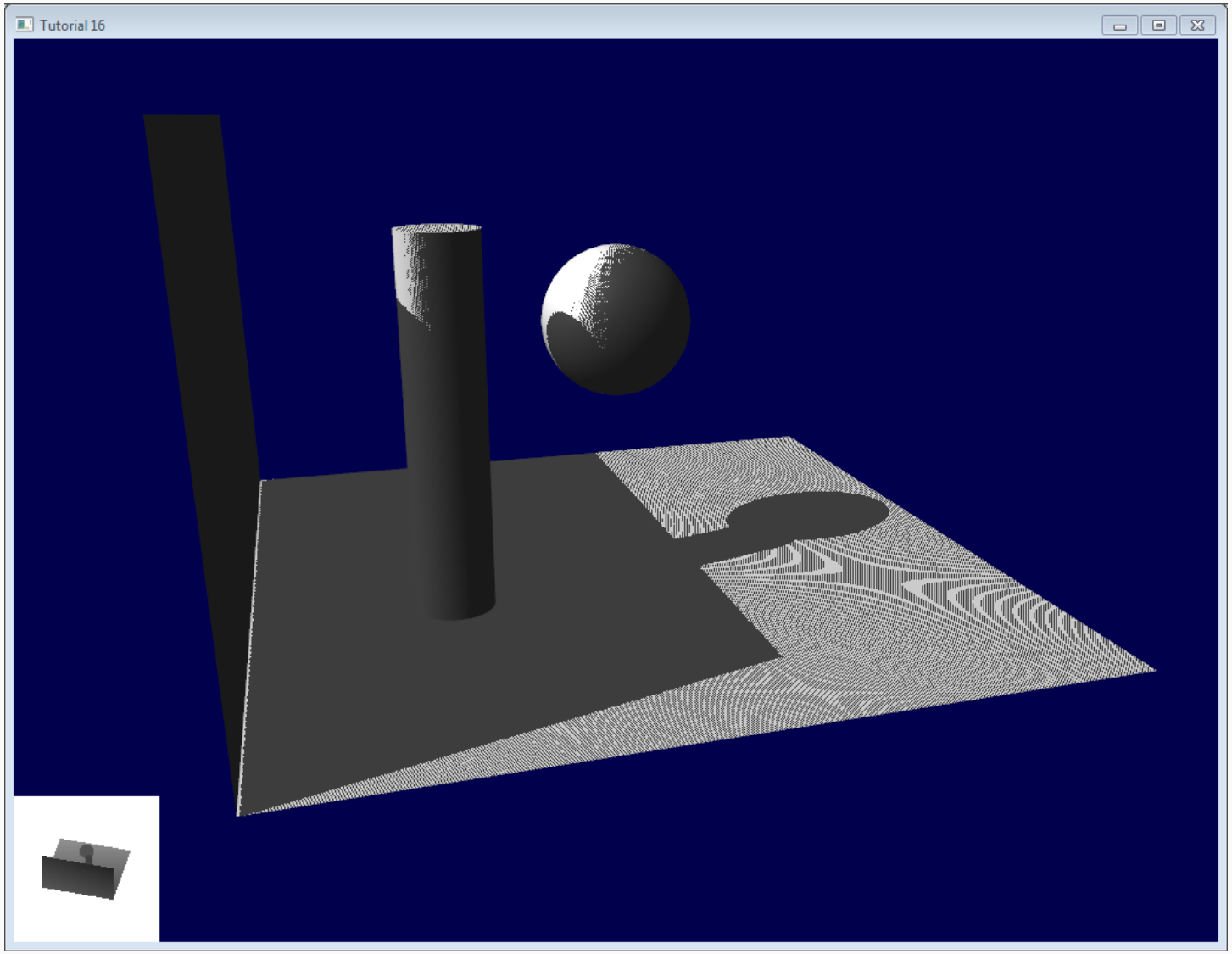
Shadow mapping: фрагментный шейдер

```
// Матрица проекции, с которой рисовался shadow map
uniform mat4 shadow_projection;
// Буфер глубины (shadow map)
uniform sampler2D shadow_depth;

in vec3 position;

void main(){
  vec4 shadow_coord = shadow_projection * vec4(position, 1.0);
  shadow_coord /= shadow_coord.w; // perspective divide

  if (abs(shadow_coord.x) < 1.0 && abs(shadow_coord.y) < 1.0){
    shadow_coord = shadow_coord * 0.5 + vec2(0.5);

    bool in_shadow = texture(shadow_depth, shadow_coord.xy).r
        < shadow_coord.z;

    if (!in_shadow) {
        // рассчёт освещения
        ...
    }
  }
}
```

Shadow mapping: буфер глубины



Shadow mapping: результат



Shadow mapping: проекция

- Как выбрать проекцию камеры (`shadow_transform`) для shadow map?

Shadow mapping: проекция

- Как выбрать проекцию камеры (`shadow_transform`) для shadow map?
- Удалённый источник освещает всю сцену с одного направления $\Longrightarrow$ удобно использовать ортографическую проекцию

Shadow mapping: проекция

- Как выбрать проекцию камеры (`shadow_transform`) для shadow map?
- Удалённый источник освещает всю сцену с одного направления $\Longrightarrow$ удобно использовать ортографическую проекцию
- Проекцию надо подобрать так, чтобы в видимую область попала вся сцена

Shadow mapping: проекция

- Как выбрать проекцию камеры (`shadow_transform`) для shadow map?
- Удалённый источник освещает всю сцену с одного направления $\Longrightarrow$ удобно использовать ортографическую проекцию
- Проекцию надо подобрать так, чтобы в видимую область попала вся сцена
- Можно спроецировать все объекты на плоскость, перпендикулярную направлению на свет (которое можно считать Z-осью этой камеры), взять любые два ортогональных вектора X и Y в этой плоскости, и найти bounding box сцены в координатах XYZ – это даст размеры и ориентацию области shadow map

Shadow mapping: проекция

- Точечный источник светит во все стороны $\Longrightarrow$ удобно использовать перспективную проекцию и cubemap-текстуру

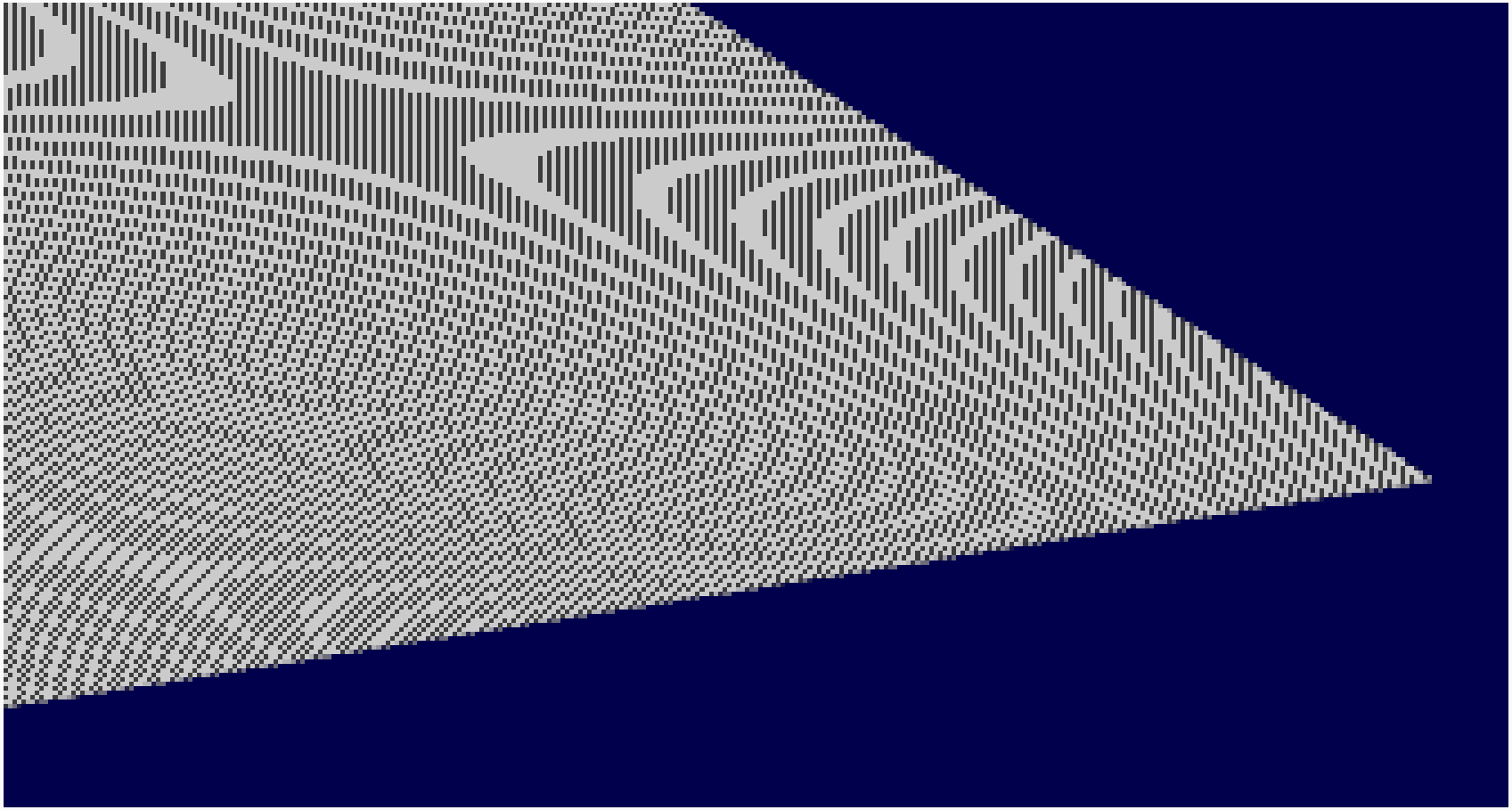
Shadow mapping: проекция

- Точечный источник светит во все стороны $\Longrightarrow$ удобно использовать перспективную проекцию и cubemap-текстуру
- 6 shadow map (по одной на каждую грань) с соответствующей перспективной проекцией

Shadow mapping: проекция

- Точечный источник светит во все стороны $\Longrightarrow$ удобно использовать перспективную проекцию и cubemap-текстуру
- 6 shadow map (по одной на каждую грань) с соответствующей перспективной проекцией
- Положение камеры совпадает с положением источника света, виртуальный ‘экран’ совпадает с отрисовываемой гранью shadow map

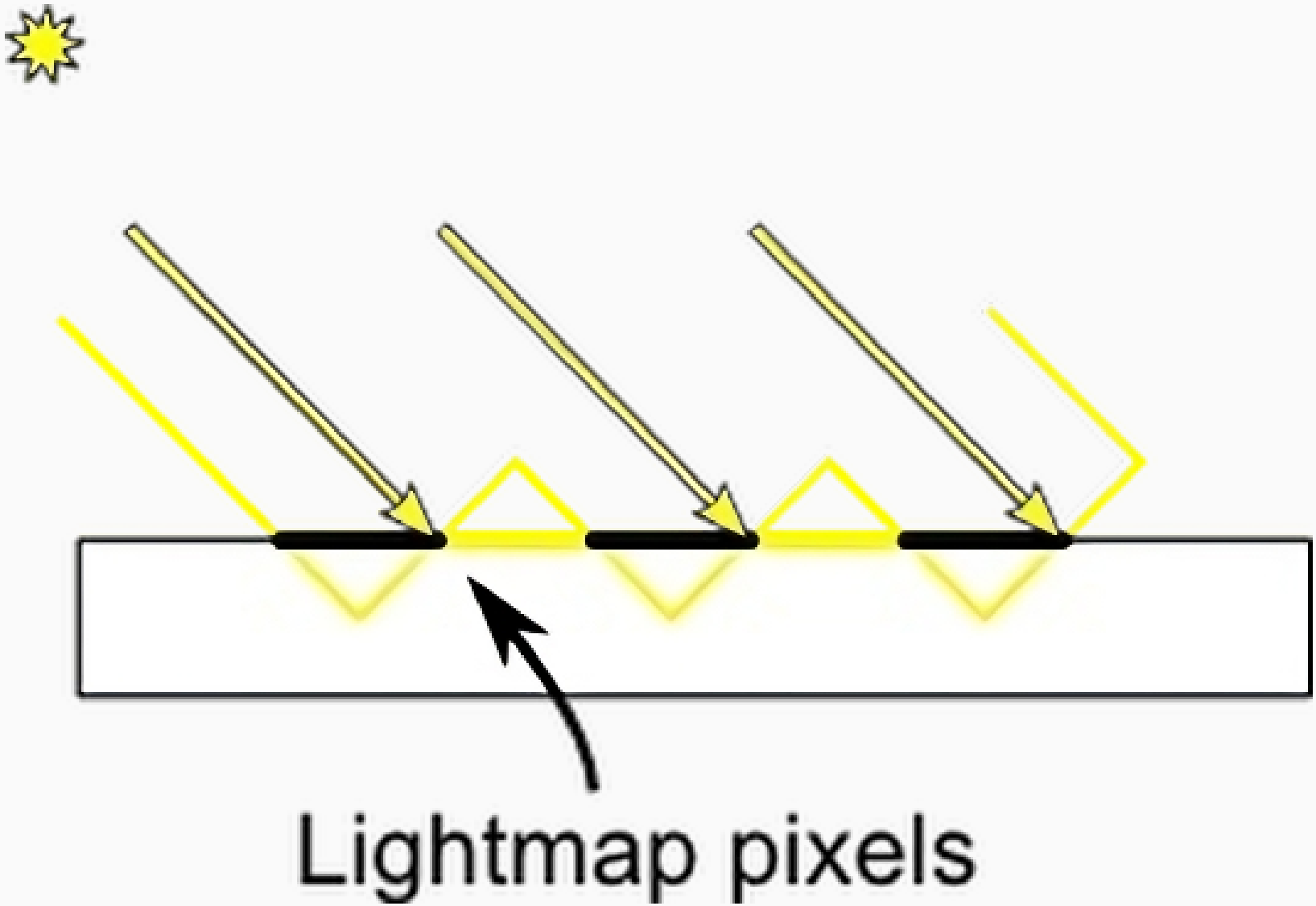
Shadow acne



Shadow acne

- Артефакт, возникающий из-за дискретности shadow map: если луч света не перпендикулярен плоскости объекта, рядом с центром пикселя shadow map будут точки с меньшей или большей глубиной

Shadow acne



Shadow acne

- Артефакт, возникающий из-за дискретности shadow map: если луч света не перпендикулярен плоскости объекта, рядом с центром пикселя shadow map будут точки с меньшей или большей глубиной

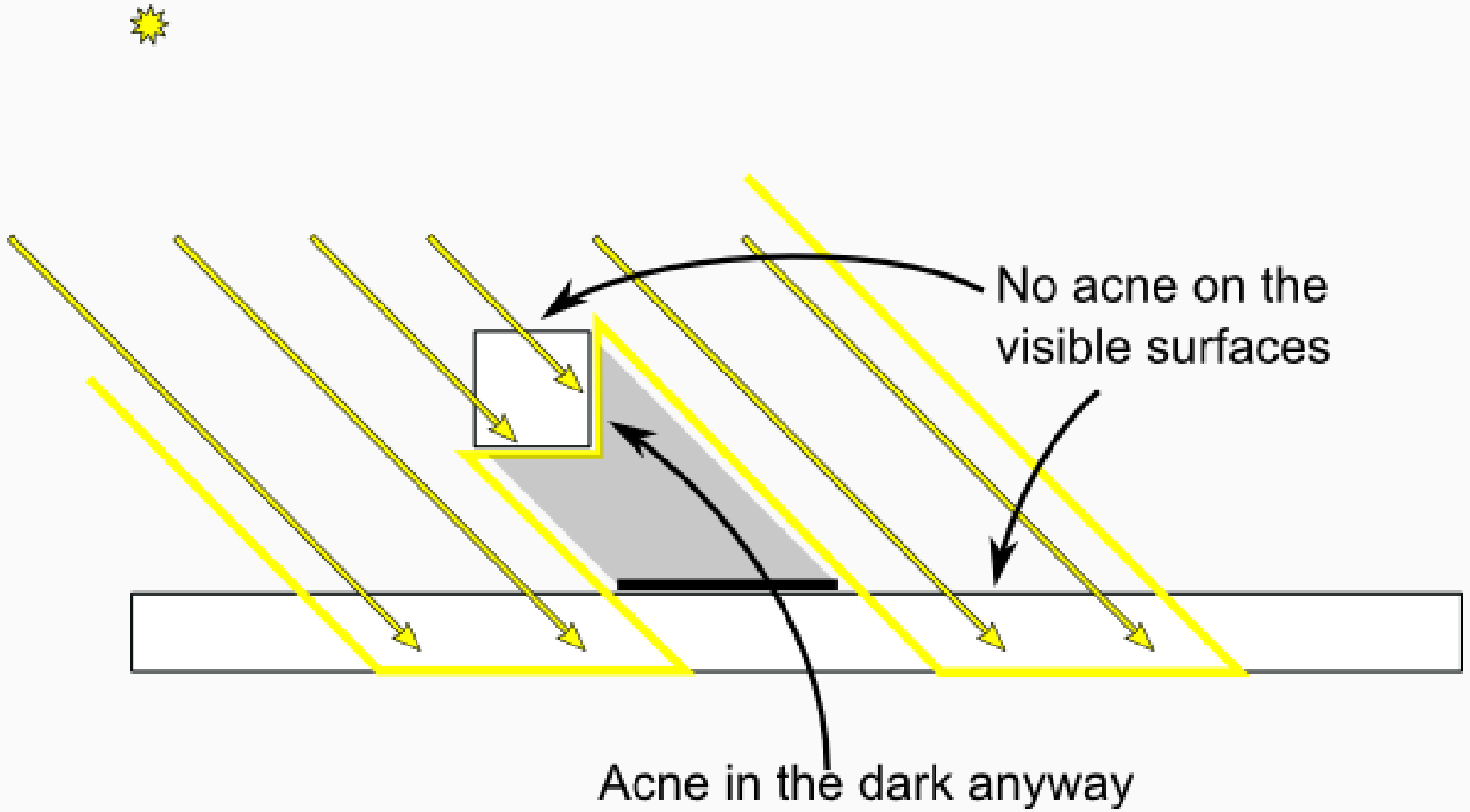
Shadow acne

- Артефакт, возникающий из-за дискретности shadow map: если луч света не перпендикулярен плоскости объекта, рядом с центром пикселя shadow map будут точки с меньшей или большей глубиной
- Первый способ исправить: добавить к значению, прочитанному из из shadow map, некую константу (shadow bias)
    - Часто эту константу умножают на тангенс угла падения света

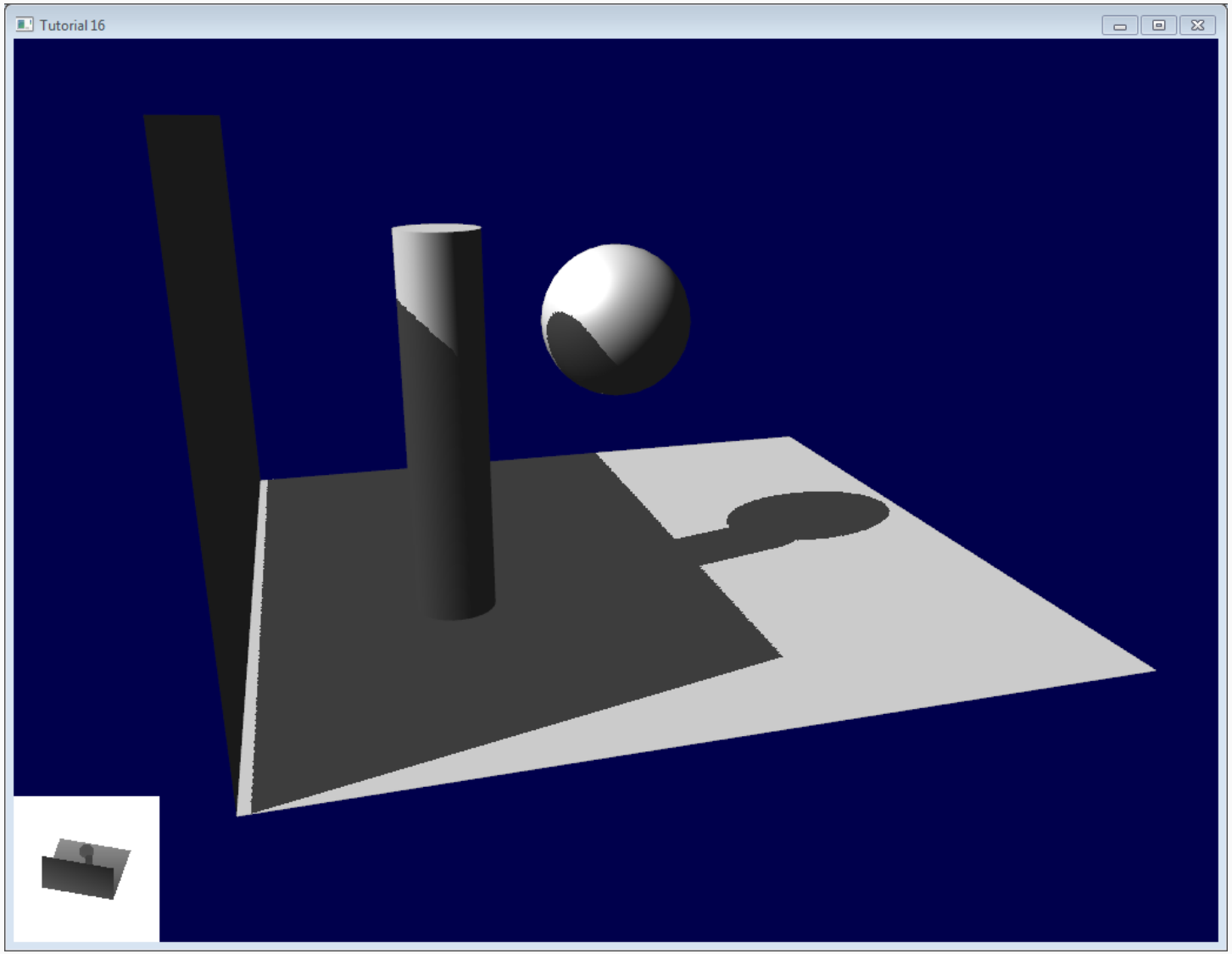
Shadow acne

- Артефакт, возникающий из-за дискретности shadow map: если луч света не перпендикулярен плоскости объекта, рядом с центром пикселя shadow map будут точки с меньшей или большей глубиной
- Первый способ исправить: добавить к значению, прочитанному из из shadow map, некую константу (shadow bias)
  - Часто эту константу умножают на тангенс угла падения света
- Второй способ исправить: рисовать только back-facing грани (т.е. обращённые против света) в shadow map
  - Теперь shadow acne возникнет на back-facing гранях, но мы и без shadow map знаем, что они в тени!
  - Работает только с правильной геометрией (двусторонней, без дырок, и т.п.)

Back-facing shadows



Peter panning



Peter panning

- Объекты кажутся приподнятыми над поверхностью из-за того, что их тень начинается не сразу под объектом

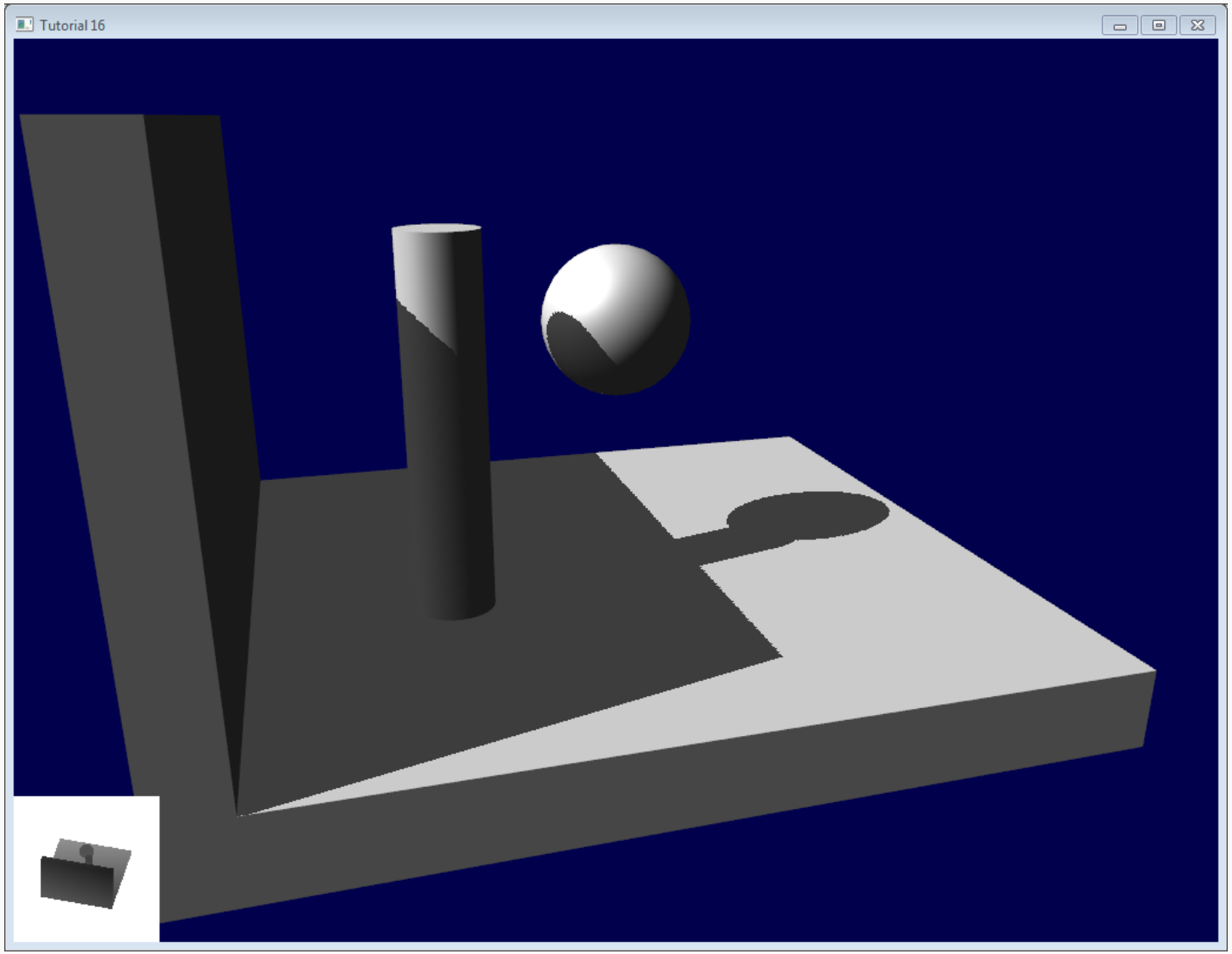
Peter panning

- Объекты кажутся приподнятыми над поверхностью из-за того, что их тень начинается не сразу под объектом
- Усиливается при использовании shadow bias

Peter panning

- Объекты кажутся приподнятыми над поверхностью из-за того, что их тень начинается не сразу под объектом
- Усиливается при использовании shadow bias
- Лучший способ исправить – не использовать слишком тонкую геометрию

Shadow mapping



Разрешение shadow map

Shadow mapping

- При низком разрешении shadow map хорошо видны ‘пиксели’ теней

Shadow mapping

- При низком разрешении shadow map хорошо видны ‘пиксели’ теней
- Чем выше разрешение, тем лучше жёсткая тень

Shadow mapping

- При низком разрешении shadow map хорошо видны ‘пиксели’ теней
- Чем выше разрешение, тем лучше жёсткая тень
    - Алгоритм silhouette mapping позволяет получить жёсткую тень без слишком большого разрешения

Shadow mapping

- При низком разрешении shadow map хорошо видны ‘пиксели’ теней
- Чем выше разрешение, тем лучше жёсткая тень
  - Алгоритм silhouette mapping позволяет получить жёсткую тень без слишком большого разрешения
- Можно слегка размыть тень, избавившись от ‘пикселей’ и получив аппроксимацию мягких теней

Shadow mapping

- При низком разрешении shadow map хорошо видны ‘пиксели’ теней
- Чем выше разрешение, тем лучше жёсткая тень
  - Алгоритм silhouette mapping позволяет получить жёсткую тень без слишком большого разрешения
- Можно слегка размыть тень, избавившись от ‘пикселей’ и получив аппроксимацию мягких теней
  - Размывать нужно результат сравнения глубины со значением в shadow map, а **не** саму shadow map!

Shadow mapping

- При низком разрешении shadow map хорошо видны ‘пиксели’ теней
- Чем выше разрешение, тем лучше жёсткая тень
  - Алгоритм silhouette mapping позволяет получить жёсткую тень без слишком большого разрешения
- Можно слегка размыть тень, избавившись от ‘пикселей’ и получив аппроксимацию мягких теней
  - Размывать нужно результат сравнения глубины со значением в shadow map, а **не** саму shadow map!
  - Percentage-closer filtering (PCF)

Shadow mapping

- При низком разрешении shadow map хорошо видны ‘пиксели’ теней
- Чем выше разрешение, тем лучше жёсткая тень
  - Алгоритм silhouette mapping позволяет получить жёсткую тень без слишком большого разрешения
- Можно слегка размыть тень, избавившись от ‘пикселей’ и получив аппроксимацию мягких теней
  - Размывать нужно результат сравнения глубины со значением в shadow map, а **не** саму shadow map!
  - Percentage-closer filtering (PCF)
  - В OpenGL есть встроенная реализация: shadow samplers

Shadow mapping

- При низком разрешении shadow map хорошо видны ‘пиксели’ теней
- Чем выше разрешение, тем лучше жёсткая тень
  - Алгоритм silhouette mapping позволяет получить жёсткую тень без слишком большого разрешения
- Можно слегка размыть тень, избавившись от ‘пикселей’ и получив аппроксимацию мягких теней
  - Размывать нужно результат сравнения глубины со значением в shadow map, а **не** саму shadow map!
  - Percentage-closer filtering (PCF)
  - В OpenGL есть встроенная реализация: shadow samplers
- Более современные вариации shadow maps пишут в текстуру не глубину, а какие-нибудь значения, которые имеет смысл складывать и усреднять

Shadow mapping

- При низком разрешении shadow map хорошо видны ‘пиксели’ теней
- Чем выше разрешение, тем лучше жёсткая тень
  - Алгоритм silhouette mapping позволяет получить жёсткую тень без слишком большого разрешения
- Можно слегка размыть тень, избавившись от ‘пикселей’ и получив аппроксимацию мягких теней
  - Размывать нужно результат сравнения глубины со значением в shadow map, а **не** саму shadow map!
  - Percentage-closer filtering (PCF)
  - В OpenGL есть встроенная реализация: shadow samplers
- Более современные вариации shadow maps пишут в текстуру не глубину, а какие-нибудь значения, которые имеет смысл складывать и усреднять
  - Позволяет использовать фильтрацию текстур, mipmaps, размытие shadow map

Shadow mapping

- При низком разрешении shadow map хорошо видны ‘пиксели’ теней
- Чем выше разрешение, тем лучше жёсткая тень
  - Алгоритм silhouette mapping позволяет получить жёсткую тень без слишком большого разрешения
- Можно слегка размыть тень, избавившись от ‘пикселей’ и получив аппроксимацию мягких теней
  - Размывать нужно результат сравнения глубины со значением в shadow map, а **не** саму shadow map!
  - Percentage-closer filtering (PCF)
  - В OpenGL есть встроенная реализация: shadow samplers
- Более современные вариации shadow maps пишут в текстуру не глубину, а какие-нибудь значения, которые имеет смысл складывать и усреднять
  - Позволяет использовать фильтрацию текстур, mipmaps, размытие shadow map
  - Exponential shadow maps, variance shadow maps

Shadow sampler

- В OpenGL есть ограниченная поддержка PCF в виде *shadow samplers*

Shadow sampler

- В OpenGL есть ограниченная поддержка PCF в виде *shadow samplers*
- Для текстуры нужно настроить параметры:
  - `GL_TEXTURE_COMPARE_MODE` в значение `GL_COMPARE_REF_TO_TEXTURE`
  - `GL_TEXTURE_COMPARE_FUNC` в значение `GL_LEQUAL` (теоретически могут быть `GL_ALWAYS` и т.п.)

Shadow sampler

- В OpenGL есть ограниченная поддержка PCF в виде *shadow samplers*
- Для текстуры нужно настроить параметры:
  - `GL_TEXTURE_COMPARE_MODE` в значение `GL_COMPARE_REF_TO_TEXTURE`
  - `GL_TEXTURE_COMPARE_FUNC` в значение `GL_LEQUAL` (теоретически могут быть `GL_ALWAYS` и т.п.)
- Текстуру с `GL_COMPARE_REF_TO_TEXTURE` **нельзя** использовать как `sampler2D`, для неё есть отдельный тип sampler'а: `sampler2DShadow`

Shadow sampler

- Функция `texture(shadow_map, texcoord)` принимает трёхмерный вектор текстурных координат:
  - Первые две – обычные X,Y текстурные координаты
  - Третья – используется для сравнения со значением в shadow map

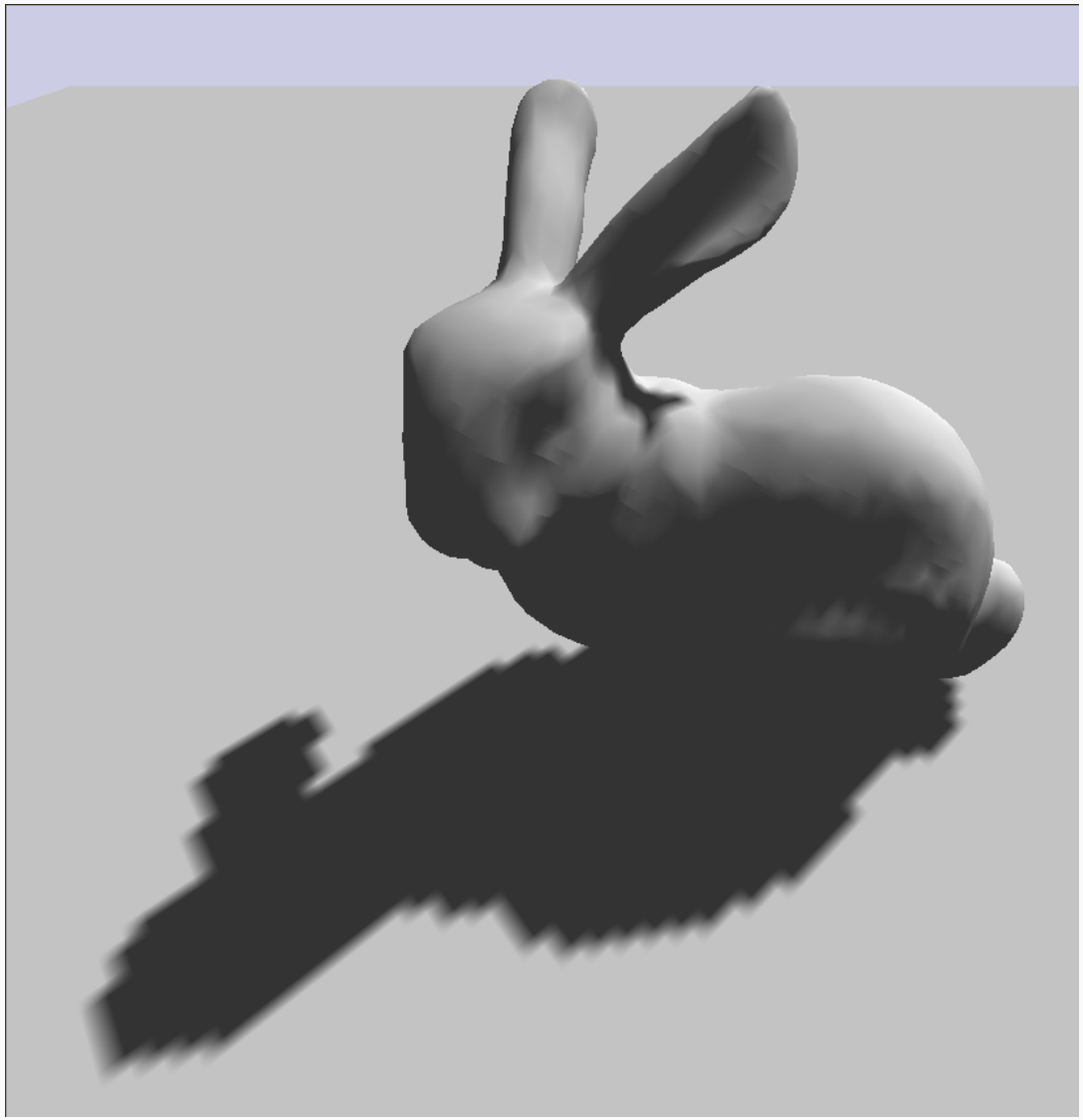
Shadow sampler

- Функция `texture(shadow_map, texcoord)` принимает трёхмерный вектор текстурных координат:
  - Первые две – обычные X,Y текстурные координаты
  - Третья – используется для сравнения со значением в shadow map
- Если сравнение успешно, возвращается 1, иначе 0 (функция сравнения настраивается `GL_TEXTURE_COMPARE_FUNC`)

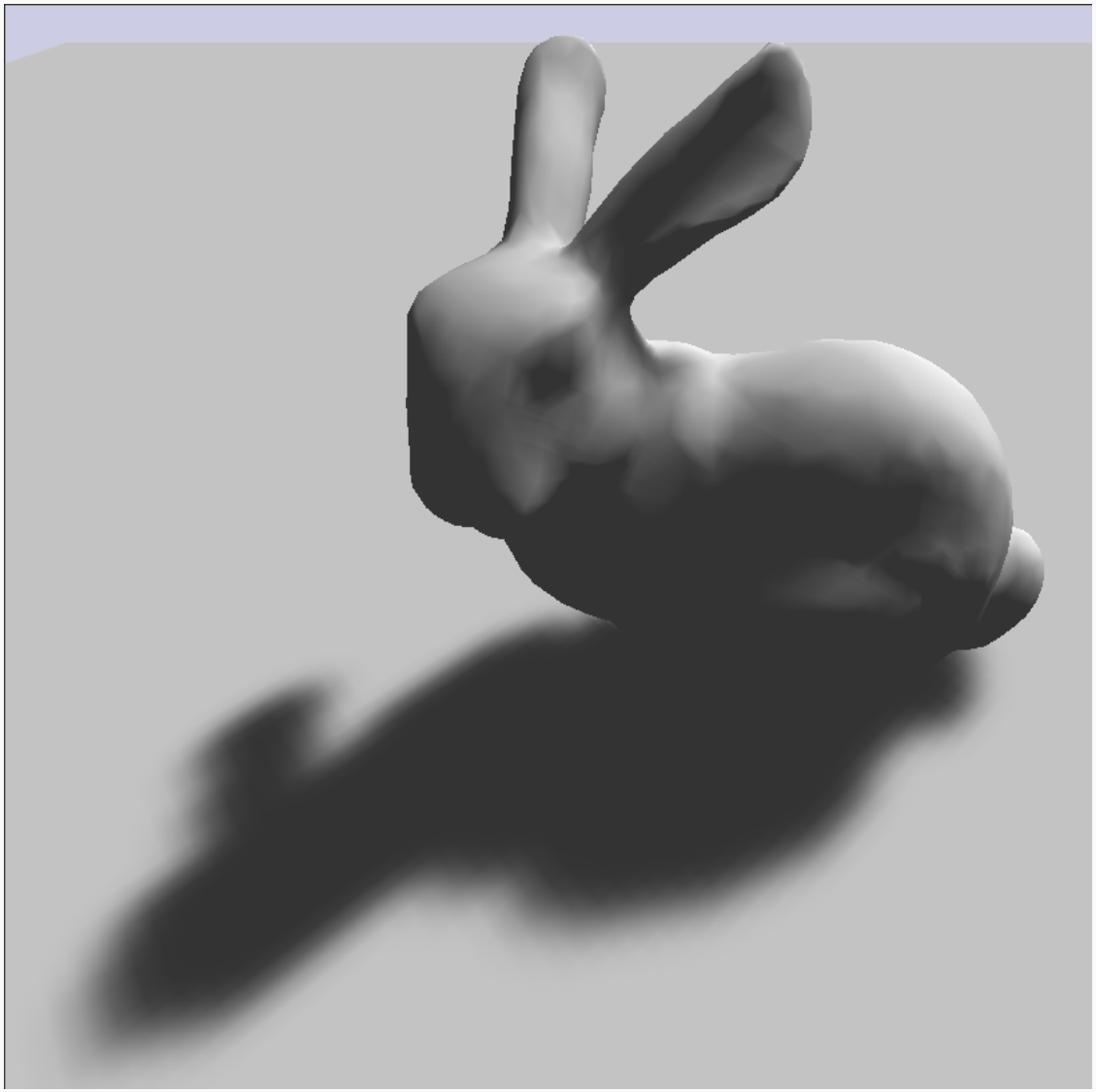
Shadow sampler

- Функция `texture(shadow_map, texcoord)` принимает трёхмерный вектор текстурных координат:
  - Первые две – обычные X,Y текстурные координаты
  - Третья – используется для сравнения со значением в shadow map
- Если сравнение успешно, возвращается 1, иначе 0 (функция сравнения настраивается `GL_TEXTURE_COMPARE_FUNC`)
- Для такой текстуры можно включить линейную фильтрацию – интерполироваться будут не значения глубины, а *результаты сравнения*

Shadow sampler с линейной фильтрацией



Shadow sampler с линейной фильтрацией и 7x7 размытием по Гауссу



Shadow mapping: ссылки

- learnopengl.com/Advanced-Lighting/Shadows/Shadow-Mapping
- opengl-tutorial.org/intermediate-tutorials/tutorial-16-shadow-mapping
- ogldev.org/www/tutorial23/tutorial23.html
- GPU Gems 2, Chapter 17. Efficient Soft-Edged Shadows Using Pixel Shader Branching