

Компьютерная графика

Лекция 9: Геометрические шейдеры, shadow volumes, shadow mapping и его разновидности

2021

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 менять тип примитива и количество вершин

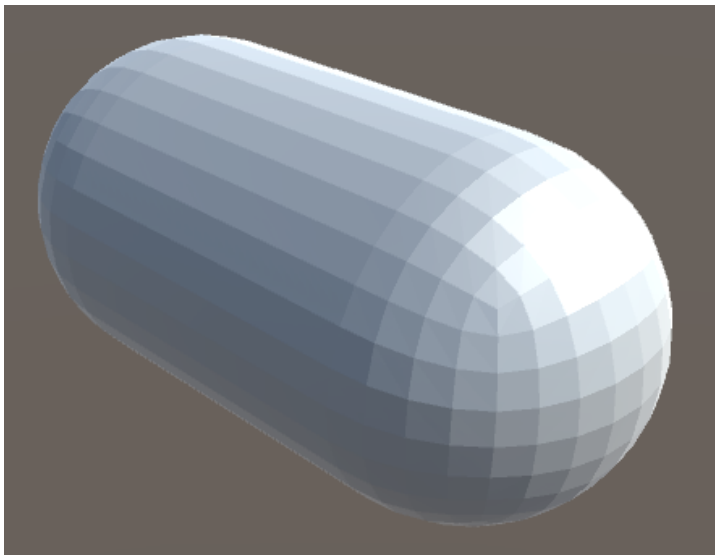
Геометрические шейдеры

- ▶ 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 менять тип примитива и количество вершин
- ▶ Может варьировать количество вершин на выходе

Геометрические шейдеры: примеры использования

- ▶ Расчёт нормалей для flat shading'a

Flat shading



Геометрические шейдеры: примеры использования

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

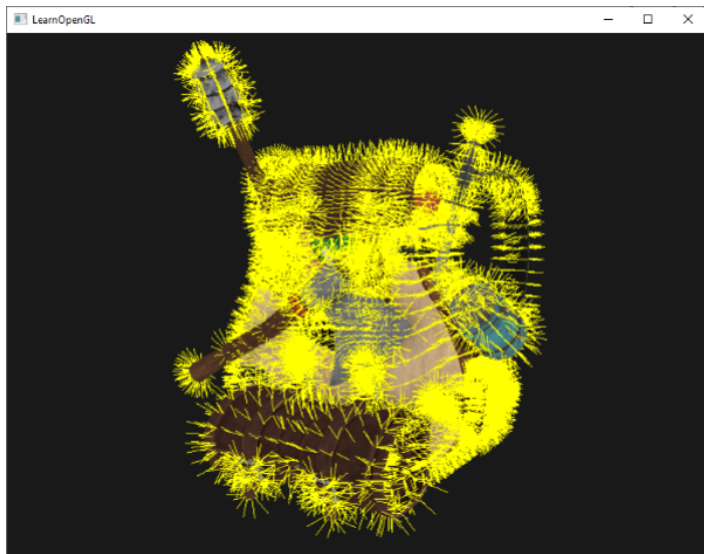
Геометрические шейдеры: примеры использования

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

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

Визуализация нормалей



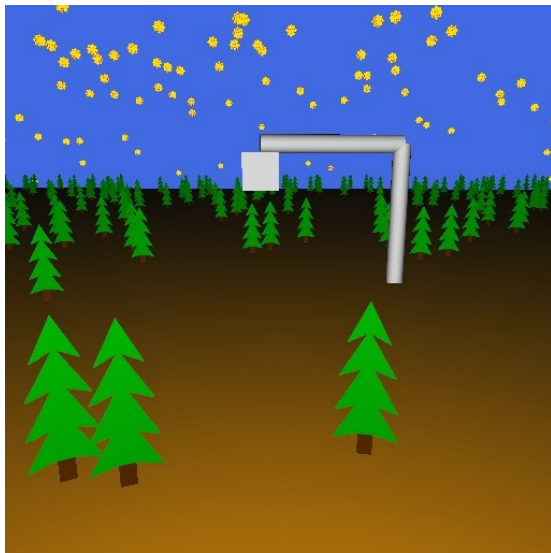
Геометрические шейдеры: примеры использования

- ▶ 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
- ▶ Shadow volumes

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
- ▶ 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
- ▶ 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
- ▶ Billboards - плоские фигуры, всегда смотрящие в сторону камеры
 - ▶ Вход: одна вершина (точка)
 - ▶ Выход: набор треугольников
 - ▶ Системы частиц

Billboards: система частиц (дым)



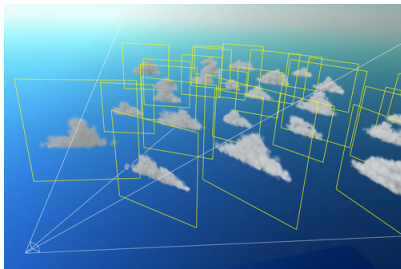
Геометрические шейдеры: примеры использования

- ▶ 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
- ▶ 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
- ▶ 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
- ▶ 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
- ▶ Billboards - плоские фигуры, всегда смотрящие в сторону камеры
 - ▶ Вход: одна вершина (точка)
 - ▶ Выход: набор треугольников
 - ▶ Системы частиц
 - ▶ Облака
 - ▶ 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
- ▶ Billboards - плоские фигуры, всегда смотрящие в сторону камеры
 - ▶ Вход: одна вершина (точка)
 - ▶ Выход: набор треугольников
 - ▶ Системы частиц
 - ▶ Облака
 - ▶ 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
- ▶ Billboards - плоские фигуры, всегда смотрящие в сторону камеры
 - ▶ Вход: одна вершина (точка)
 - ▶ Выход: набор треугольников
 - ▶ Системы частиц
 - ▶ Облака
 - ▶ Деревья
 - ▶ Трава

Billboards: трава



Геометрические шейдеры: пример

```
#version 330 core
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

```
#version 330 core
// 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();

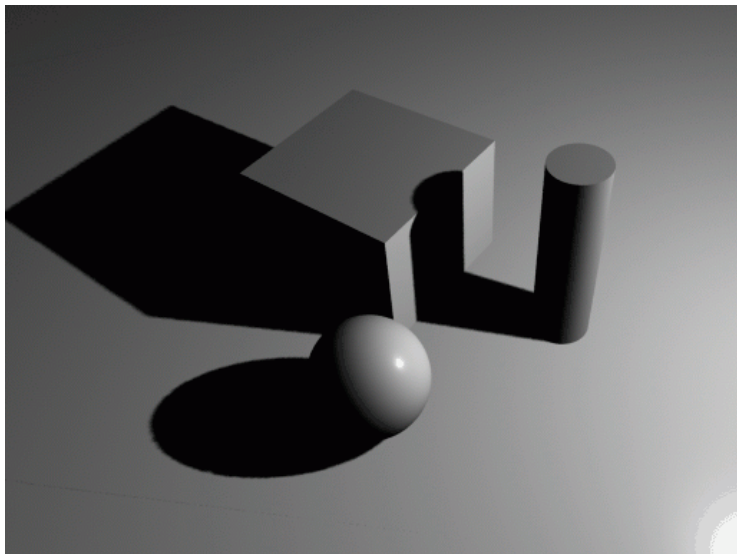
    EndPrimitive();
}
```

Геометрические шейдеры: ссылки

- ▶ [khronos.org/opengl/wiki/Geometry_Shader](https://www.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: 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) \Rightarrow жёсткие тени (hard shadows)

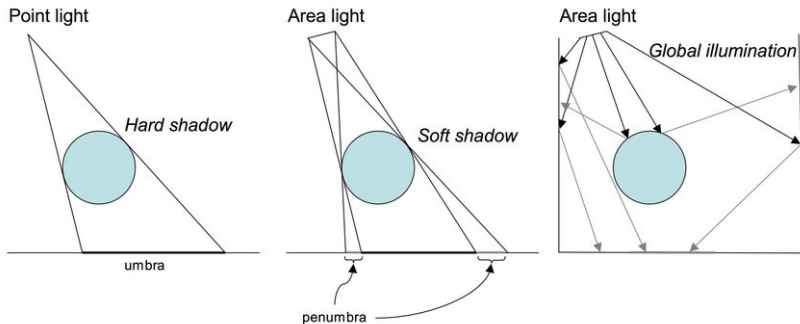
Тени: теория

- ▶ 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) \Rightarrow 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 \Rightarrow мягкие тени (soft shadows)

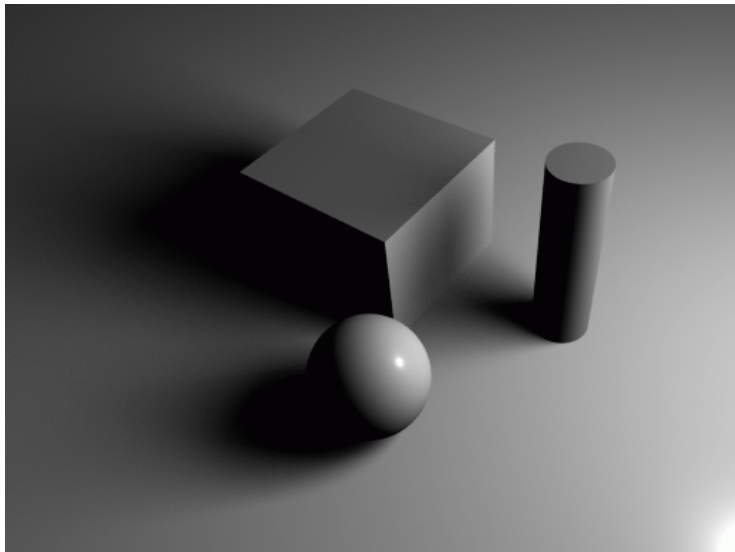
Тени: теория

- ▶ 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) \Rightarrow 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 \Rightarrow мягкие тени (soft shadows)
 - ▶ Точки, полностью находящиеся в тени - *umbra*
 - ▶ Точки, частично находящиеся в тени - *penumbra*

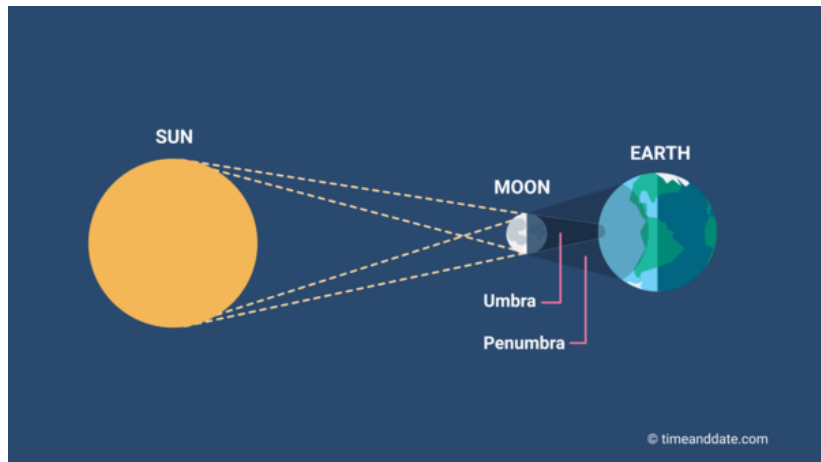
Тени: мягкие vs жёсткие



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 $\rightarrow \infty$ 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 $\rightarrow \infty$ мягкая тень вырождается в жёсткую
- ▶ В real-time графике получить правильные тени (как жёсткие, так и мягкие) довольно сложно

Тени: алгоритмы

- ▶ Shadow volumes

Тени: алгоритмы

► Shadow volumes

- + Идеальные жёсткие тени
- — Алиасинг
- — Сложно сделать мягкие тени
- — Очень большой fill rate (количество обрабатываемых пикселей), плохо предсказуемая производительность

Тени: алгоритмы

- ▶ Shadow volumes
 - ▶ + Идеальные жёсткие тени
 - ▶ — Алиасинг
 - ▶ — Сложно сделать мягкие тени
 - ▶ — Очень большой fill rate (количество обрабатываемых пикселей), плохо предсказуемая производительность
- ▶ Shadow mapping

Тени: алгоритмы

► Shadow volumes

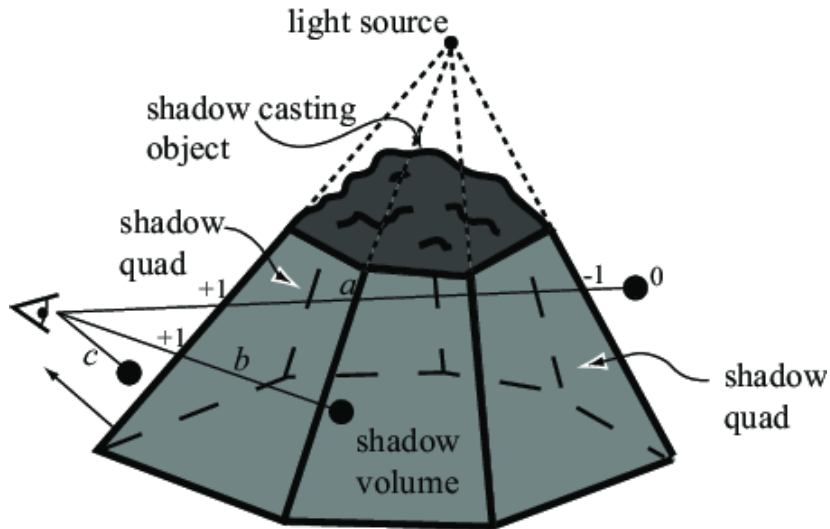
- + Идеальные жёсткие тени
- — Алиасинг
- — Сложно сделать мягкие тени
- — Очень большой fill rate (количество обрабатываемых пикселей), плохо предсказуемая производительность

► 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)

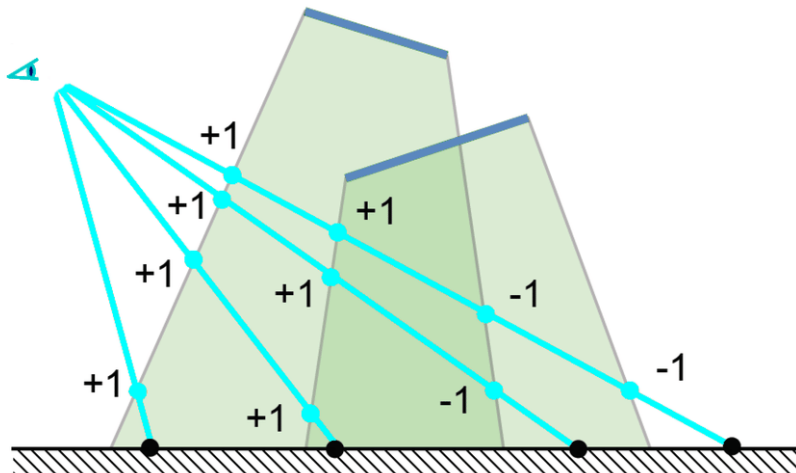
Shadow volumes (они же stencil shadows)

- ▶ 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)



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

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
- ▶ Обратно включаем рисование цвета и глубины

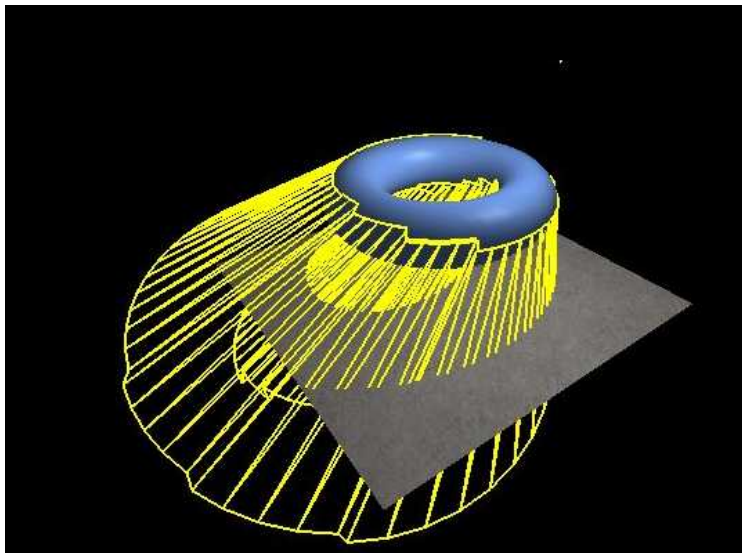
Shadow volumes: алгоритм

- ▶ 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
- ▶ Обратно включаем рисование цвета и глубины
- ▶ Настраиваем stencil-тест так, чтобы рисовать только пиксели, в которых `stencil=0`, и рисуем сцену шейдером, вычисляющим освещение

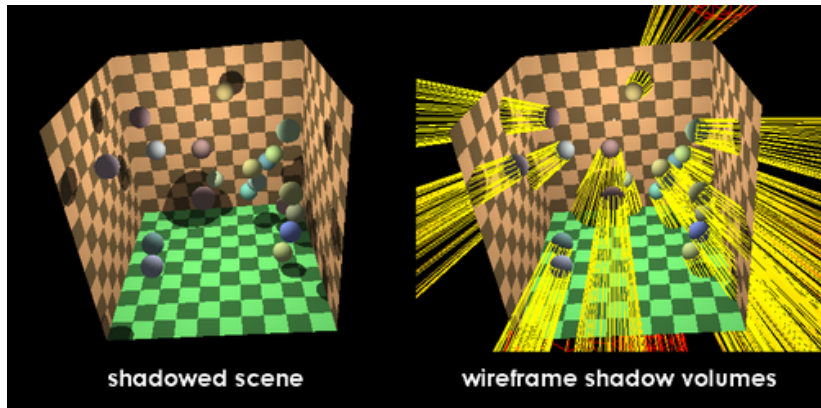
Shadow volumes: алгоритм

- ▶ 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
- ▶ 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 volume



Shadow volume



Shadow volumes (Doom 3)



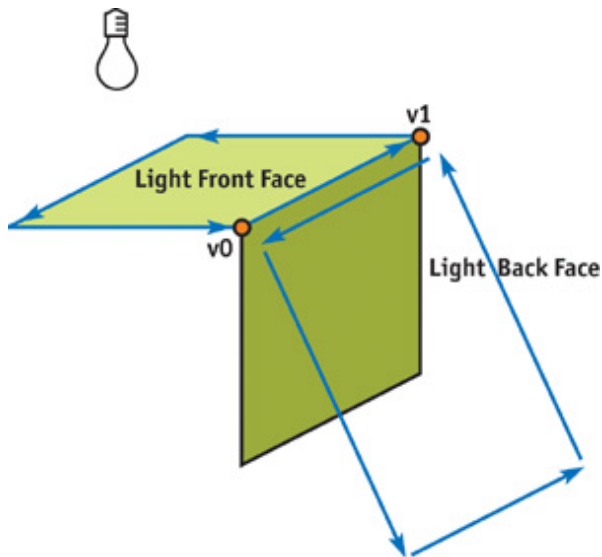
Shadow volumes: как вычислять shadow volume?

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

Shadow volumes: как вычислять shadow volume?

- ▶ Шаг 1: определить shadow edges - рёбра модели, у которых один соседний треугольник обращён к источнику света ($\vec{n} \cdot \vec{r} > 0$), а второй - против источника света ($\vec{n} \cdot \vec{r} \leq 0$)
- ▶ Шаг 2: для каждого shadow edge построить четырёхугольную грань shadow volume - к точкам ребра p_1, p_2 добавляются 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 $D \rightarrow \infty$, 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 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 тип примитива *lines adjacency*, позволяющий передать 4 вершины как один примитив (две вершины ребра + две вершины соседних треугольников)
 - ▶ Шейдер проверяет, является ли ребро shadow edge, и генерирует грань shadow volume

Shadow volumes

- ▶ + Pixel-perfect жёсткие тени
- ▶ — Алиасинг
- ▶ — Сложно получить мягкие тени
- ▶ — Требуется правильной 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
⇒ 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)

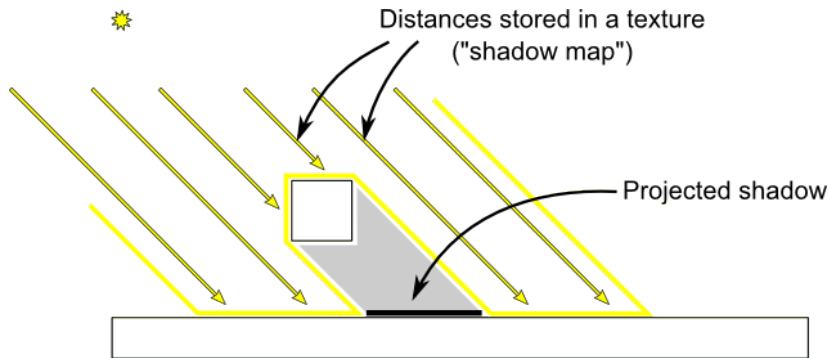
Shadow mapping: алгоритм

- ▶ 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* 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* 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

```
#version 330 core
// Матрица (projection * view) с которой рисовался shadow map
uniform mat4 shadow_transform;
// Буфер глубины (shadow map)
uniform sampler2D shadow_depth;

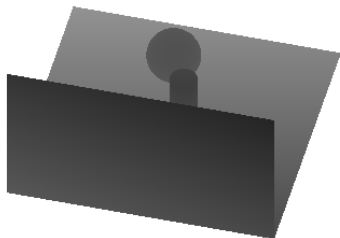
in vec3 position;

void main(){
    vec4 shadow_coord = shadow_transform * vec4(position, 1.0);
    shadow_coord /= shadow_coord.w; // perspective divide
    shadow_coord = shadow_coord * 0.5 + vec2(0.5);

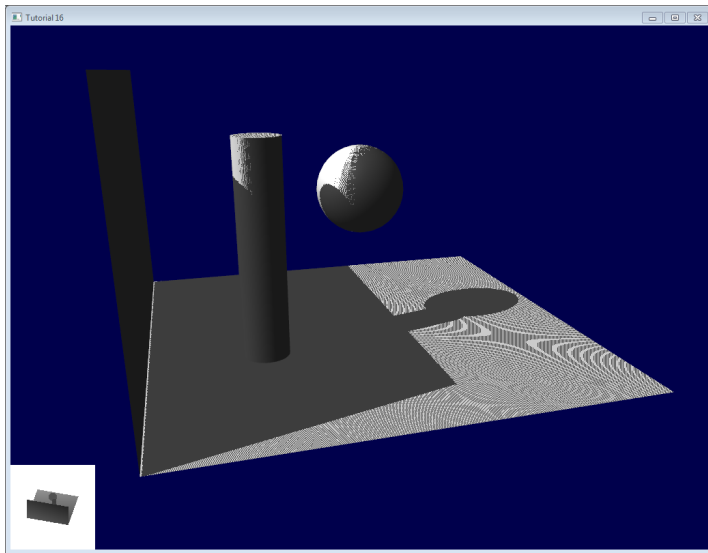
    bool in_shadow = texture(shadow_depth, shadow_coord.xy).r
        < shadow_coord.z;

    ...
}
```

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 \Rightarrow удобно использовать ортографическую проекцию

Shadow mapping: проекция

- ▶ Как выбрать проекцию камеры (`shadow_transform`) для shadow map?
- ▶ Удалённый источник освещает всю сцену с одного направления \Rightarrow 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 \Rightarrow 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

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

Shadow mapping: проекция

- ▶ Как выбрать проекцию камеры (`shadow_transform`) для shadow map?
- ▶ Точечный источник светит во все стороны \Rightarrow удобно использовать перспективную проекцию и submap-текстуру

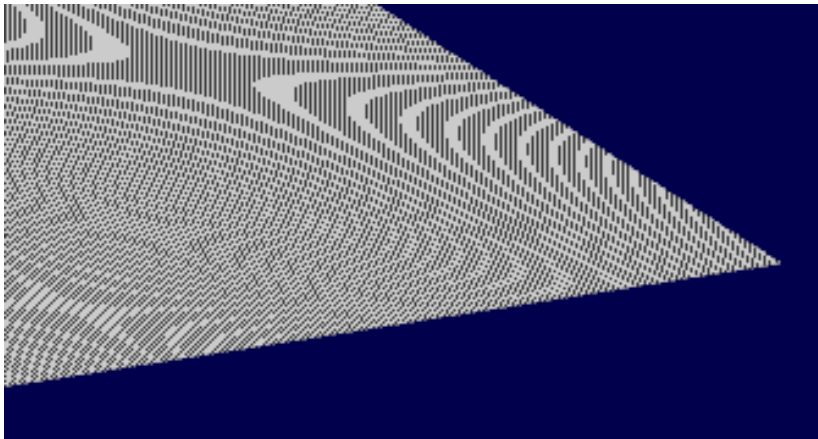
Shadow mapping: проекция

- ▶ Как выбрать проекцию камеры (`shadow_transform`) для shadow map?
- ▶ Точечный источник светит во все стороны \Rightarrow удобно использовать перспективную проекцию и subemap-текстуру
- ▶ 6 рендерингов shadow map (по одному на каждую грань) с соответствующей перспективной проекцией

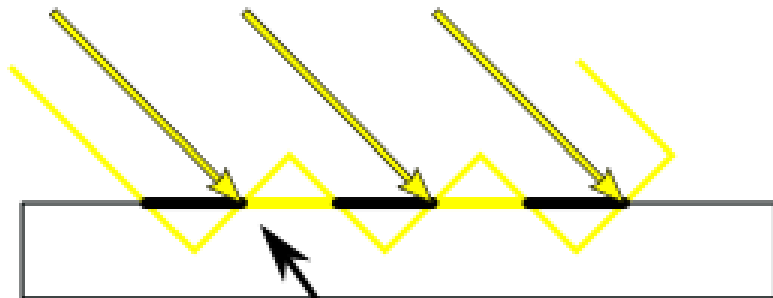
Shadow mapping: проекция

- ▶ Как выбрать проекцию камеры (`shadow_transform`) для shadow map?
- ▶ Точечный источник светит во все стороны \Rightarrow удобно использовать перспективную проекцию и subemap-текстуру
- ▶ 6 рендерингов shadow map (по одному 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



Lightmap pixels

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

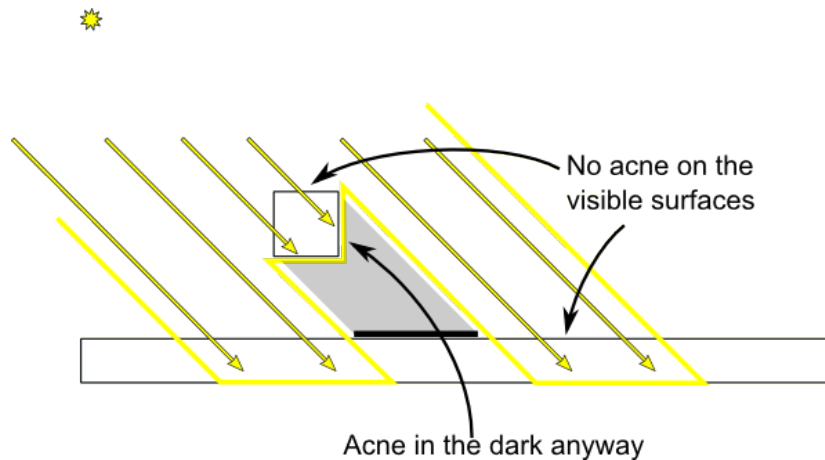
Shadow acne

- ▶ 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 shadow map, некую константу (shadow bias)
 - ▶ Часто эту константу умножают на тангенс угла падения света

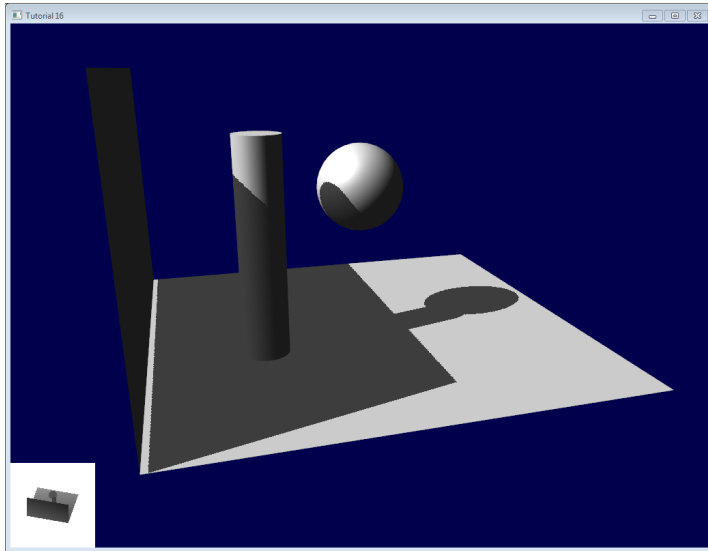
Shadow acne

- ▶ 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 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

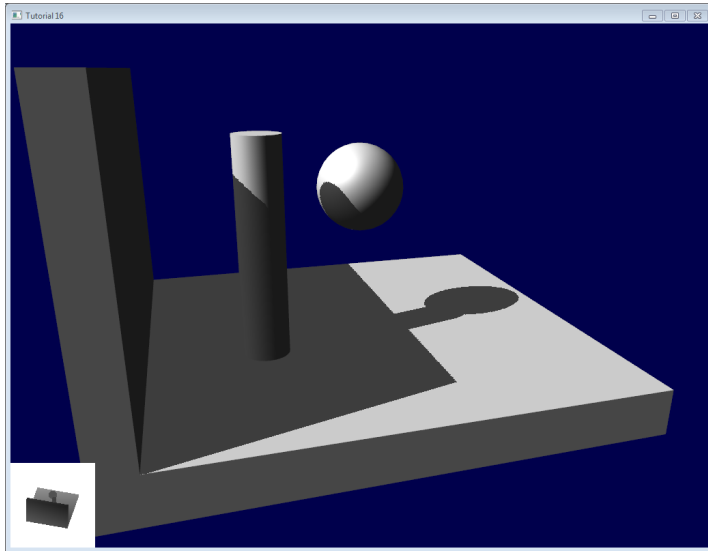
Peter panning

- ▶ 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

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
 - ▶ 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
 - ▶ 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
 - ▶ 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, mipmap, 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
 - ▶ 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 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