# Компьютерная графика

## Лекция 9: Вычисление проекции для shadow mapping, ESM, VSM, PSM, CSM, Ambient Occlusion

2021

# Проекция для shadow map: точечный источник

- 6 перспективных проекций для 6 граней cubemap-текстуры shadow map (одно рисование всей сцены на каждую из них)

# Проекция для shadow map: точечный источник

- 6 перспективных проекций для 6 граней cubemap-текстуры shadow map (одно рисование всей сцены на каждую из них)
- Каждая проекция смотрит в направлении некоторой оси: $\pm X, \pm Y, \pm Z$

# Проекция для shadow map: точечный источник

- 6 перспективных проекций для 6 граней cubemap-текстуры shadow map (одно рисование всей сцены на каждую из них)
- Каждая проекция смотрит в направлении некоторой оси: $\pm X, \pm Y, \pm Z$
- Соответствующие грани cubemap-текстуры в OpenGL называются `GL_TEXTURE_CUBE_MAP_POSITIVE_X`, `GL_TEXTURE_CUBE_MAP_NEGATIVE_X` и т.д. (параметр `glTexImage2D`, `glFramebufferTexture2D`, etc)

# Проекция для shadow map: точечный источник

- 6 перспективных проекций для 6 граней cubemap-текстуры shadow map (одно рисование всей сцены на каждую из них)
- Каждая проекция смотрит в направлении некоторой оси: $\pm X, \pm Y, \pm Z$
- Соответствующие грани cubemap-текстуры в OpenGL называются `GL_TEXTURE_CUBE_MAP_POSITIVE_X`, `GL_TEXTURE_CUBE_MAP_NEGATIVE_X` и т.д. (параметр `glTexImage2D`, `glFramebufferTexture2D`, etc)
- Каждую проекцию нужно будет покрутить вокруг оси взгляда, чтобы она совпала с тем, как эта грань cubemap текстуры определена в OpenGL (проще всего – подбором одного из четырёх вращений на $90^\circ$)

# Проекция для shadow map: точечный источник

- 6 перспективных проекций для 6 граней cubemap-текстуры shadow map (одно рисование всей сцены на каждую из них)
- Каждая проекция смотрит в направлении некоторой оси: $\pm X, \pm Y, \pm Z$
- Соответствующие грани cubemap-текстуры в OpenGL называются `GL_TEXTURE_CUBE_MAP_POSITIVE_X`, `GL_TEXTURE_CUBE_MAP_NEGATIVE_X` и т.д. (параметр `glTexImage2D`, `glFramebufferTexture2D`, etc)
- Каждую проекцию нужно будет покрутить вокруг оси взгляда, чтобы она совпала с тем, как эта грань cubemap текстуры определена в OpenGL (проще всего – подбором одного из четырёх вращений на $90^\circ$)
- Угол видимой области – $90^\circ$ по обеим осям (квадратная камера, aspect ratio $= 1$)

# Проекция для shadow map: точечный источник

- `near` и `far` – максимальное (соответственно, минимальное), при котором не обрезается ничего лишнего

# Проекция для shadow map: точечный источник

- `near` и `far` – максимальное (соответственно, минимальное), при котором не обрезается ничего лишнего
  - `near` – минимальное расстояние до вершин объектов сцены
  - `far` – максимальное расстояние до вершин объектов сцены

# Проекция для shadow map: точечный источник

- `near` и `far` – максимальное (соответственно, минимальное), при котором не обрезается ничего лишнего
  - `near` – минимальное расстояние до вершин объектов сцены
  - `far` – максимальное расстояние до вершин объектов сцены
- Например, `far` можно посчитать как $\max_V |(V - C) \cdot D|$, где
  - $C$ – координаты центра проекции (источника света)
  - $D$ – единичный вектор направления взгляда проекции
  - $V$ – вершины объектов сцены

# Проекция для shadow map: точечный источник

- `near` и `far` – максимальное (соответственно, минимальное), при котором не обрезается ничего лишнего
  - `near` – минимальное расстояние до вершин объектов сцены
  - `far` – максимальное расстояние до вершин объектов сцены
- Например, `far` можно посчитать как $\max_V |(V - C) \cdot D|$, где
  - $C$ – координаты центра проекции (источника света)
  - $D$ – единичный вектор направления взгляда проекции
  - $V$ – вершины объектов сцены
- Можно заранее вычислить bounding box сцены и вычислять максимум только по его вершинам

# Проекция для shadow map: точечный источник

- `near` и `far` – максимальное (соответственно, минимальное), при котором не обрезается ничего лишнего
  - `near` – минимальное расстояние до вершин объектов сцены
  - `far` – максимальное расстояние до вершин объектов сцены
- Например, `far` можно посчитать как $\max_V |(V - C) \cdot D|$, где
  - $C$ – координаты центра проекции (источника света)
  - $D$ – единичный вектор направления взгляда проекции
  - $V$ – вершины объектов сцены
- Можно заранее вычислить bounding box сцены и вычислять максимум только по его вершинам
- Аналогично минимум для `near`

# Проекция для shadow map: направленный источник

- Одна ортографическая проекция: задаётся центром $C$ и осями $X, Y, Z$

# Проекция для shadow map: направленный источник

- Одна ортографическая проекция: задаётся центром $C$ и осями $X, Y, Z$
- $Z$ параллельный направлению на источник света

# Проекция для shadow map: направленный источник

- Одна ортографическая проекция: задаётся центром $C$ и осями $X, Y, Z$
- $Z$ параллельный направлению на источник света
- $X, Y$ перпендикулярны $Z$ (и друг другу)
  - Можно выбрать любые, перпендикулярные $Z$
  - Можно попробовать выбрать их так, чтобы максимизировать эффективное разрешение shadow map (т.е. чтобы одному пикселю shadow map соответствовала как можно меньшая область пространства) – сводится к задаче OBB (oriented bounding box)

# Проекция для shadow map: направленный источник

- Одна ортографическая проекция: задаётся центром $C$ и осями $X, Y, Z$
- $Z$ параллельный направлению на источник света
- $X, Y$ перпендикулярны $Z$ (и друг другу)
  - Можно выбрать любые, перпендикулярные $Z$
  - Можно попробовать выбрать их так, чтобы максимизировать эффективное разрешение shadow map (т.е. чтобы одному пикселю shadow map соответствовала как можно меньшая область пространства) – сводится к задаче OBB (oriented bounding box)
- Откуда взять $C$ и длины векторов $X, Y, Z$?

# Проекция для shadow map: направленный источник

- Вычислим bounding box всей сцены

# Проекция для shadow map: направленный источник

- Вычислим bounding box всей сцены
- В качестве $C$ возьмём центр bounding box'а сцены

# Проекция для shadow map: направленный источник

- Вычислим bounding box всей сцены
- В качестве $C$ возьмём центр bounding box'а сцены
- Мы знаем направление вектора $X$, нужно вычислить его длину
  - Пусть $\hat{X}$ – вектор направления (нормированный)
  - Мы хотим, чтобы для всех вершин сцены выполнялось $|(V - C) \cdot \hat{X}| \leq |X|$

# Проекция для shadow map: направленный источник

- Вычислим bounding box всей сцены
- В качестве $C$ возьмём центр bounding box'а сцены
- Мы знаем направление вектора $X$, нужно вычислить его длину
  - Пусть $\hat{X}$ – вектор направления (нормированный)
  - Мы хотим, чтобы для всех вершин сцены выполнялось $|(V - C) \cdot \hat{X}| \leq |X|$
  - Пройдёмся по всем восьми вершинам bounding box'а сцены и вычислим $\max\limits_{V} |(V - C) \cdot \hat{X}|$ – это длина вектора $X$

# Проекция для shadow map: направленный источник

- Вычислим bounding box всей сцены
- В качестве $C$ возьмём центр bounding box'а сцены
- Мы знаем направление вектора $X$, нужно вычислить его длину
  - Пусть $\hat{X}$ – вектор направления (нормированный)
  - Мы хотим, чтобы для всех вершин сцены выполнялось $|(V - C) \cdot \hat{X}| \leq |X|$
  - Пройдёмся по всем восьми вершинам bounding box'а сцены и вычислим $\max\limits_{V} |(V - C) \cdot \hat{X}|$ – это длина вектора $X$
- Аналогично для $Y, Z$

# Проблемы shadow mapping

- В базовом shadow mapping хорошо видны пиксели shadow map (квадратная лесенка на границе тени)

# Проблемы shadow mapping

- В базовом shadow mapping хорошо видны пиксели shadow map (квадратная лесенка на границе тени)
  - Тем хуже, чем больше сцена (пиксели становятся больше)
  - Особенно плохо, если тень движется

# Проблемы shadow mapping

- В базовом shadow mapping хорошо видны пиксели shadow map (квадратная лесенка на границе тени)
  - Тем хуже, чем больше сцена (пиксели становятся больше)
  - Особенно плохо, если тень движется
- Хочется сгладить тени, убрав пиксели и сделав аппроксимацию мягких теней

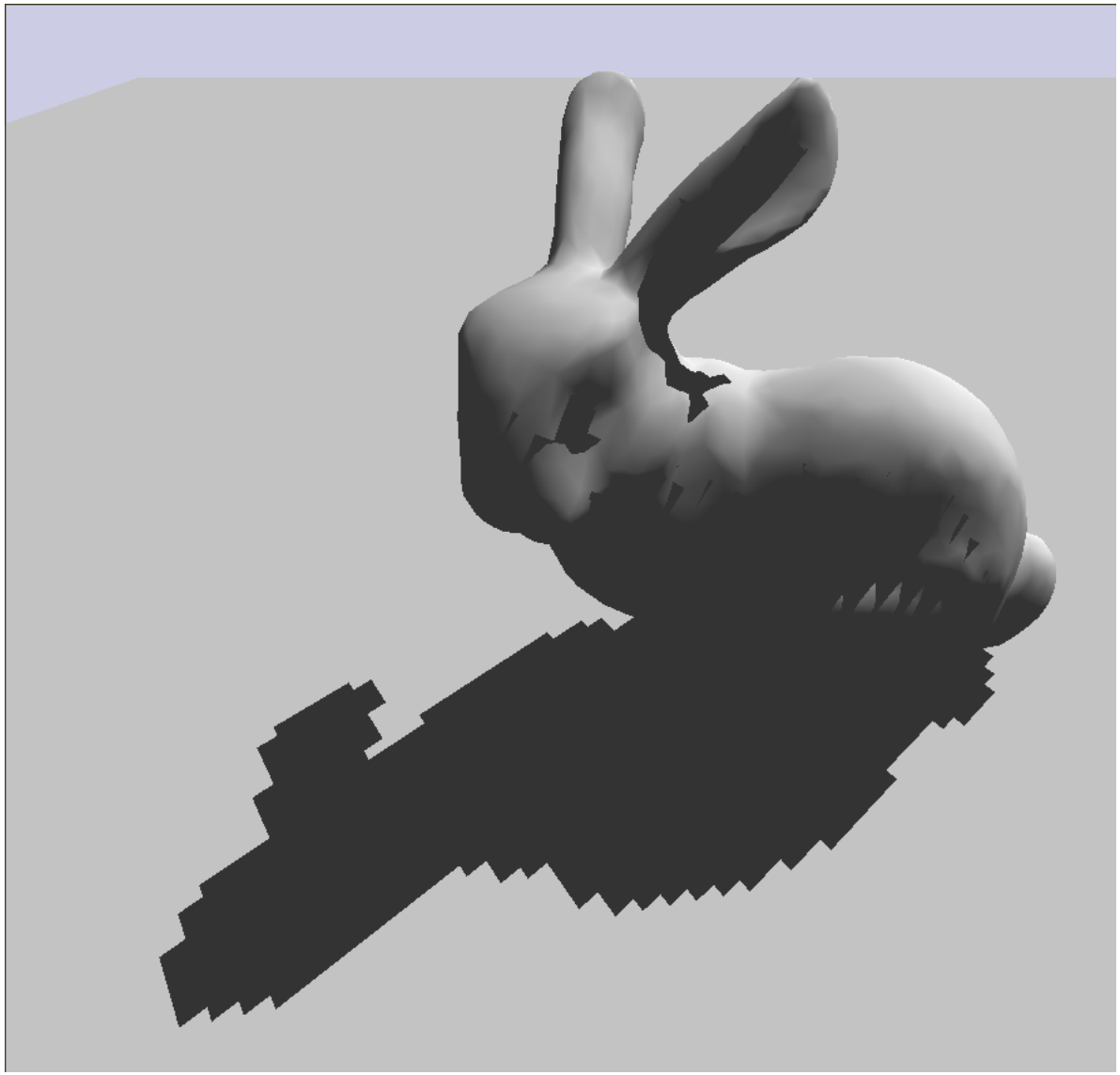
# Проблемы shadow mapping

- В базовом shadow mapping хорошо видны пиксели shadow map (квадратная лесенка на границе тени)
  - Тем хуже, чем больше сцена (пиксели становятся больше)
  - Особенно плохо, если тень движется
- Хочется сгладить тени, убрав пиксели и сделав аппроксимацию мягких теней
- Саму shadow map сглаживать (размывать / использовать линейную фильтрацию / mipmaps) нет смысла: получатся интерполированные значения глубин, сравнение с ними даёт видимые артефакты и ничего не улучшает

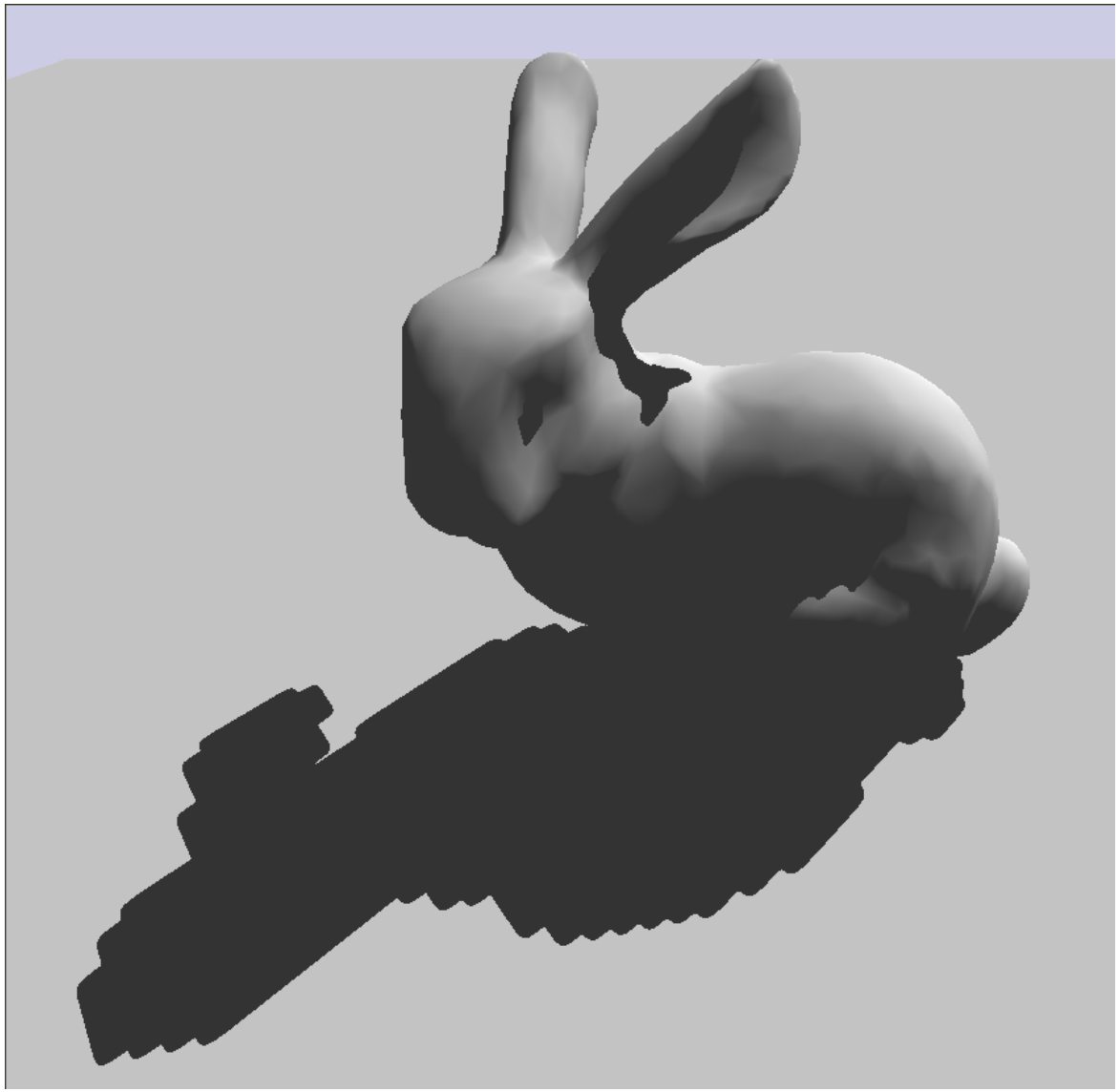
# Проблемы shadow mapping

- В базовом shadow mapping хорошо видны пиксели shadow map (квадратная лесенка на границе тени)
  - Тем хуже, чем больше сцена (пиксели становятся больше)
  - Особенно плохо, если тень движется
- Хочется сгладить тени, убрав пиксели и сделав аппроксимацию мягких теней
- Саму shadow map сглаживать (размывать / использовать линейную фильтрацию / mipmaps) нет смысла: получатся интерполированные значения глубин, сравнение с ними даёт видимые артефакты и ничего не улучшает
- Встроенный PCF усредняет только по соседним 4 пикселям, иначе приходится делать размытие несепарабельным фильтром

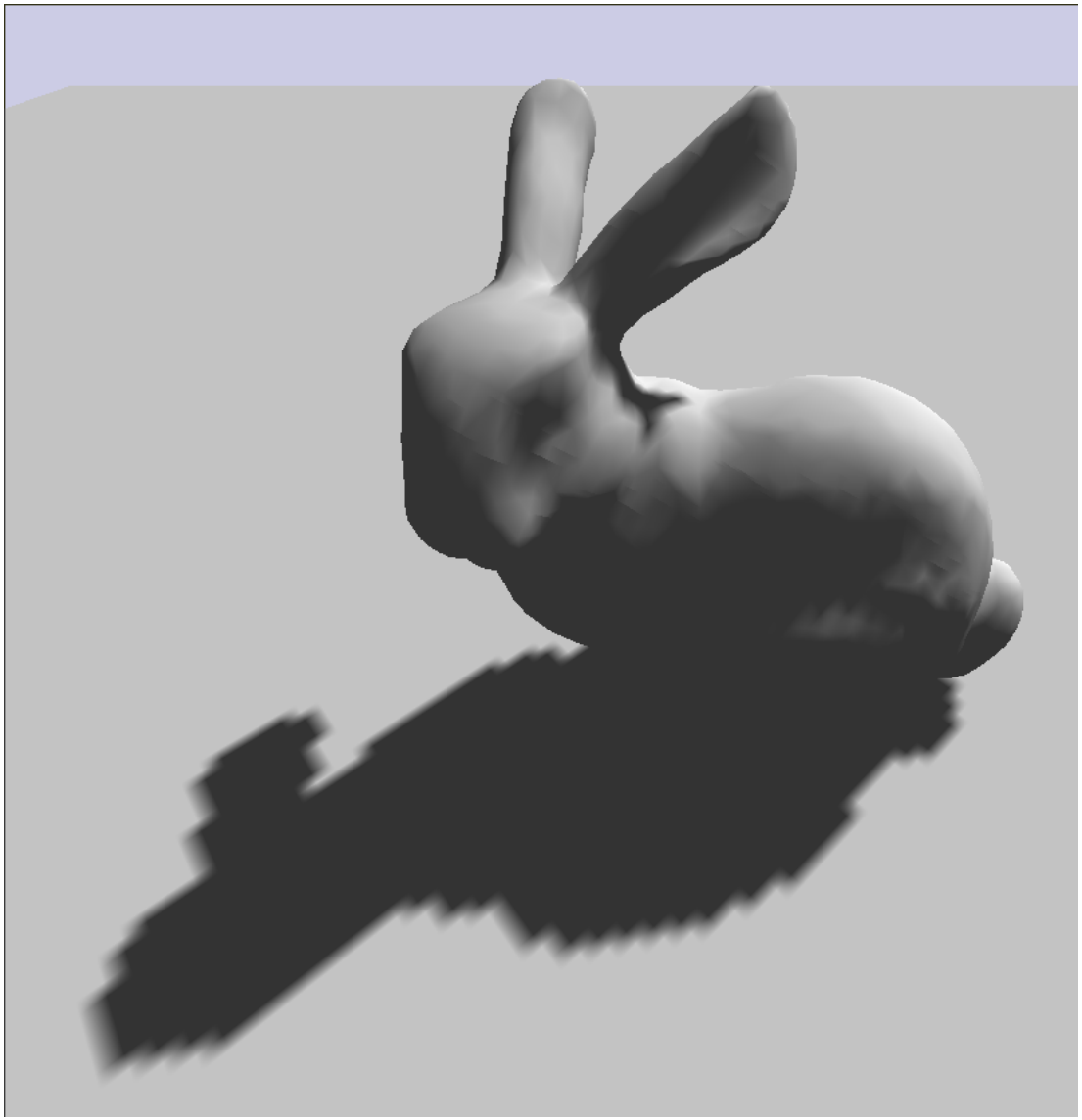
# Пиксели shadow mapping



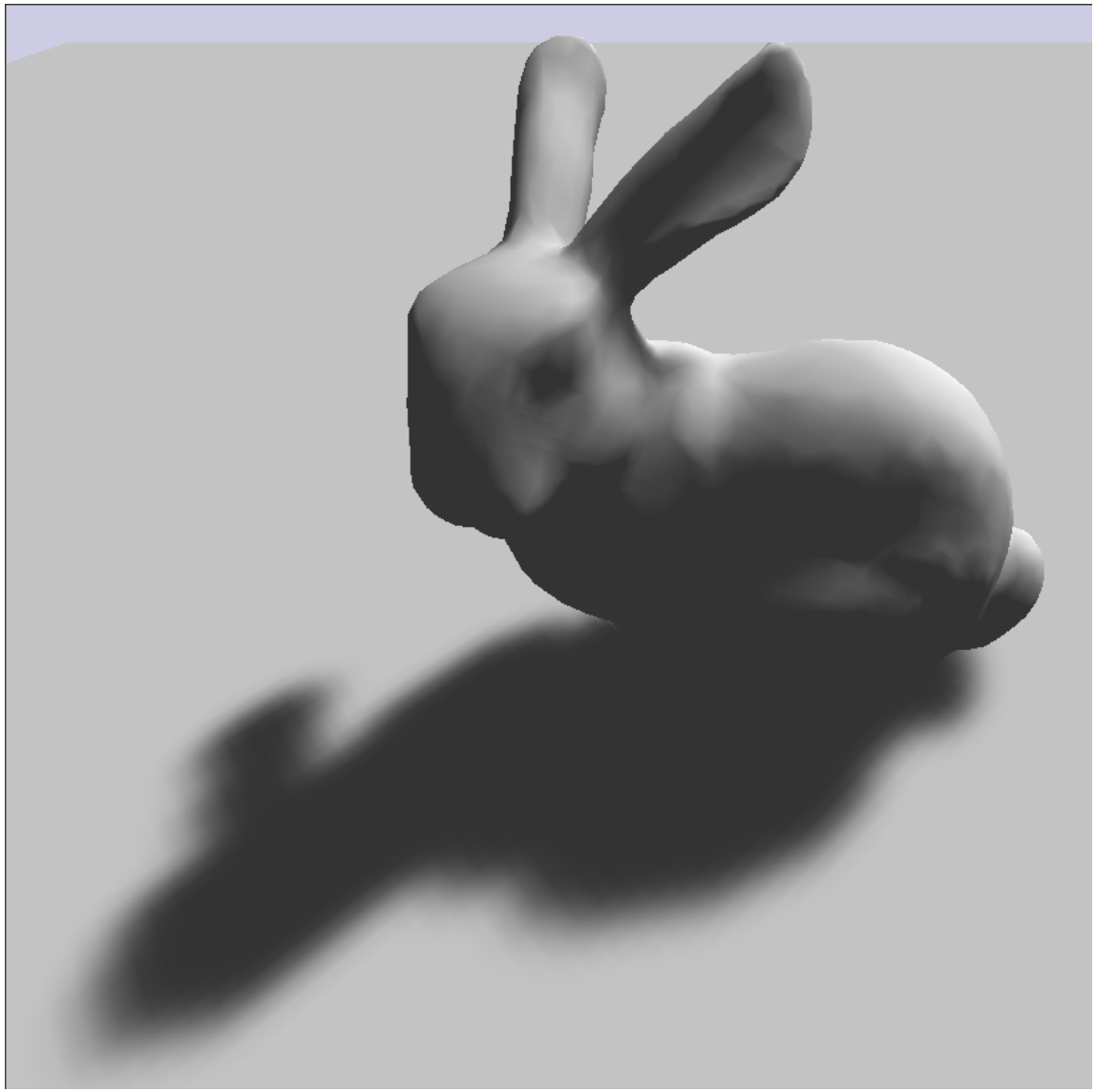
# Пиксели shadow mapping (с линейной фильтрацией)



# PCF



# PCF + 7x7 размытие



# Filtered shadow maps

- Хочется, чтобы shadow map содержал значения, которые имеет смысл интерполировать

# Filtered shadow maps

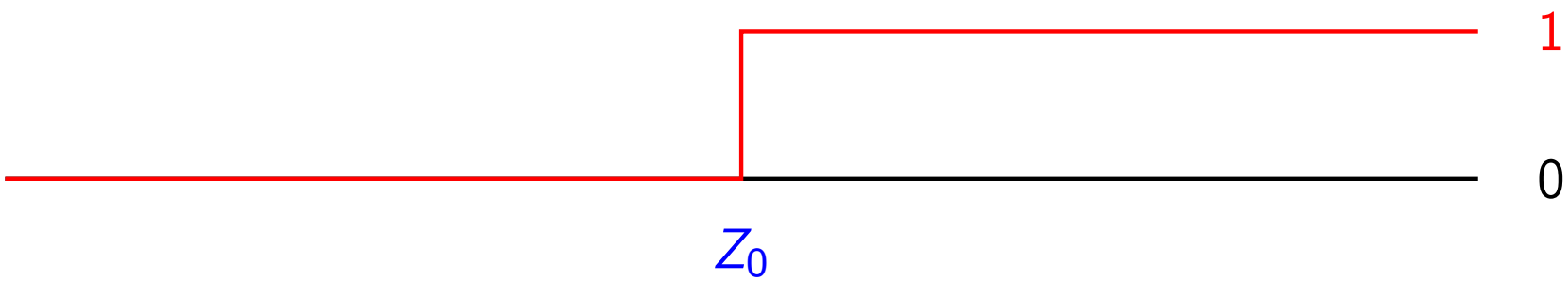
- Хочется, чтобы shadow map содержал значения, которые имеет смысл интерполировать
- Тогда можно применить весь арсенал работы с текстурами: линейную фильтрацию, mipmaps, размытие, etc.

# Filtered shadow maps

- Идея: рассматривать значение в одном пикселе shadow map как описывающем некое распределение вероятности

# Filtered shadow maps

- Идея: рассматривать значение в одном пикселе shadow map как описывающем некое распределение вероятности
- График уровня освещённости в зависимости от расстояния до источника света:



# Filtered shadow maps

- Распределения вероятности можно усреднять: если $F_1(z), F_2(z)$ – распределения вероятности, то $F(z) = (1 - t) \cdot F_1(z) + t \cdot F_2(z)$ – тоже распределение вероятности

# Filtered shadow maps

- Распределения вероятности можно усреднять: если $F_1(z), F_2(z)$ – распределения вероятности, то $F(z) = (1 - t) \cdot F_1(z) + t \cdot F_2(z)$ – тоже распределение вероятности
- Есть много вариантов того, как представить распределение одним пикселем shadow map

# Exponential shadow maps (ESM)

- Идея: функцию распределения можно аппроксимировать экспонентой
  $F(z) = \min(1, \exp(C \cdot (z_0 - z))) = \min(1, \exp(-Cz)\exp(Cz_0))$
  ($z$ – расстояние до освещаемого пикселя, $z_0$ – расстояние до источника тени)

# Exponential shadow maps (ESM)

- Идея: функцию распределения можно аппроксимировать экспонентой
  $F(z) = \min(1, \exp(C \cdot (z_0 - z))) = \min(1, \exp(-Cz)\exp(Cz_0))$
  ($z$ – расстояние до освещаемого пикселя, $z_0$ – расстояние до источника тени)
- Интерполяция таких функций сводится к интерполяции $\exp(Cz_0)$

# Exponential shadow maps (ESM)

- Идея: функцию распределения можно аппроксимировать экспонентой
  $F(z) = \min(1, \exp(C \cdot (z_0 - z))) = \min(1, \exp(-Cz)\exp(Cz_0))$
  ($z$ – расстояние до освещаемого пикселя, $z_0$ – расстояние до источника тени)
- Интерполяция таких функций сводится к интерполяции $\exp(Cz_0)$
- Будем записывать в shadow map значение $\exp(Cz_0)$

# Exponential shadow maps (ESM)

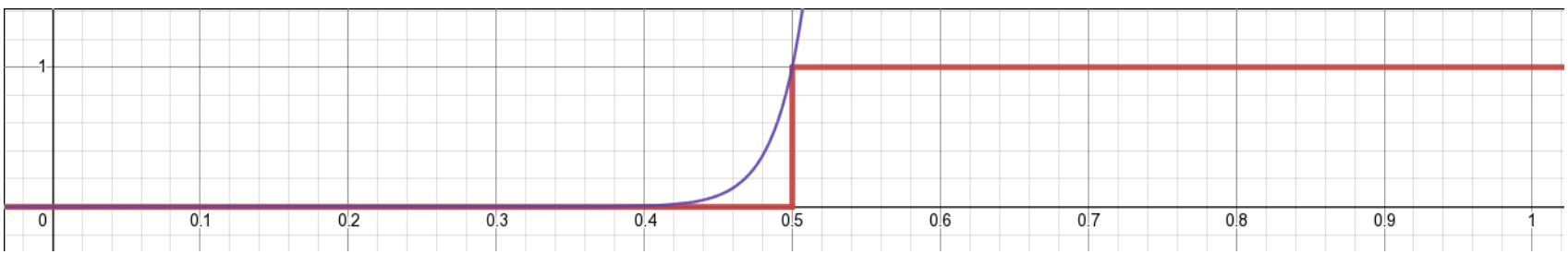
- Идея: функцию распределения можно аппроксимировать экспонентой
  $F(z) = \min(1, \exp(C \cdot (z_0 - z))) = \min(1, \exp(-Cz)\exp(Cz_0))$
  ($z$ – расстояние до освещаемого пикселя, $z_0$ – расстояние до источника тени)
- Интерполяция таких функций сводится к интерполяции $\exp(Cz_0)$
- Будем записывать в shadow map значение $\exp(Cz_0)$
- В шейдере будем умножать это значение на $\exp(-Cz)$

# Exponential shadow maps (ESM)

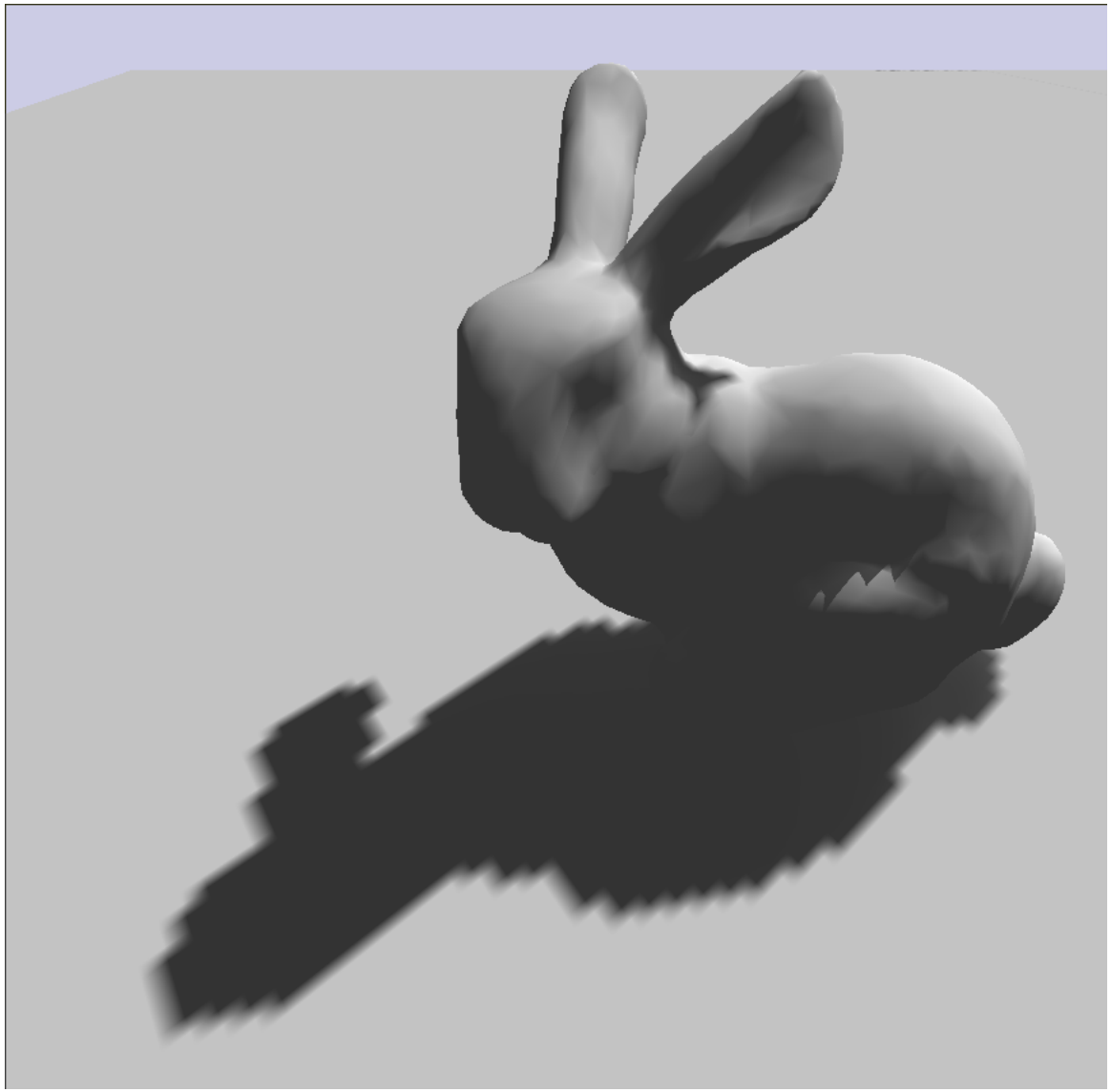
- Идея: функцию распределения можно аппроксимировать экспонентой
  $F(z) = \min(1, \exp(C \cdot (z_0 - z))) = \min(1, \exp(-Cz)\exp(Cz_0))$
  ($z$ – расстояние до освещаемого пикселя, $z_0$ – расстояние до источника тени)
- Интерполяция таких функций сводится к интерполяции $\exp(Cz_0)$
- Будем записывать в shadow map значение $\exp(Cz_0)$
- В шейдере будем умножать это значение на $\exp(-Cz)$
- Если результат больше единицы ($z < z_0$), принимаем освещённость за единицу

# Exponential shadow maps (ESM)

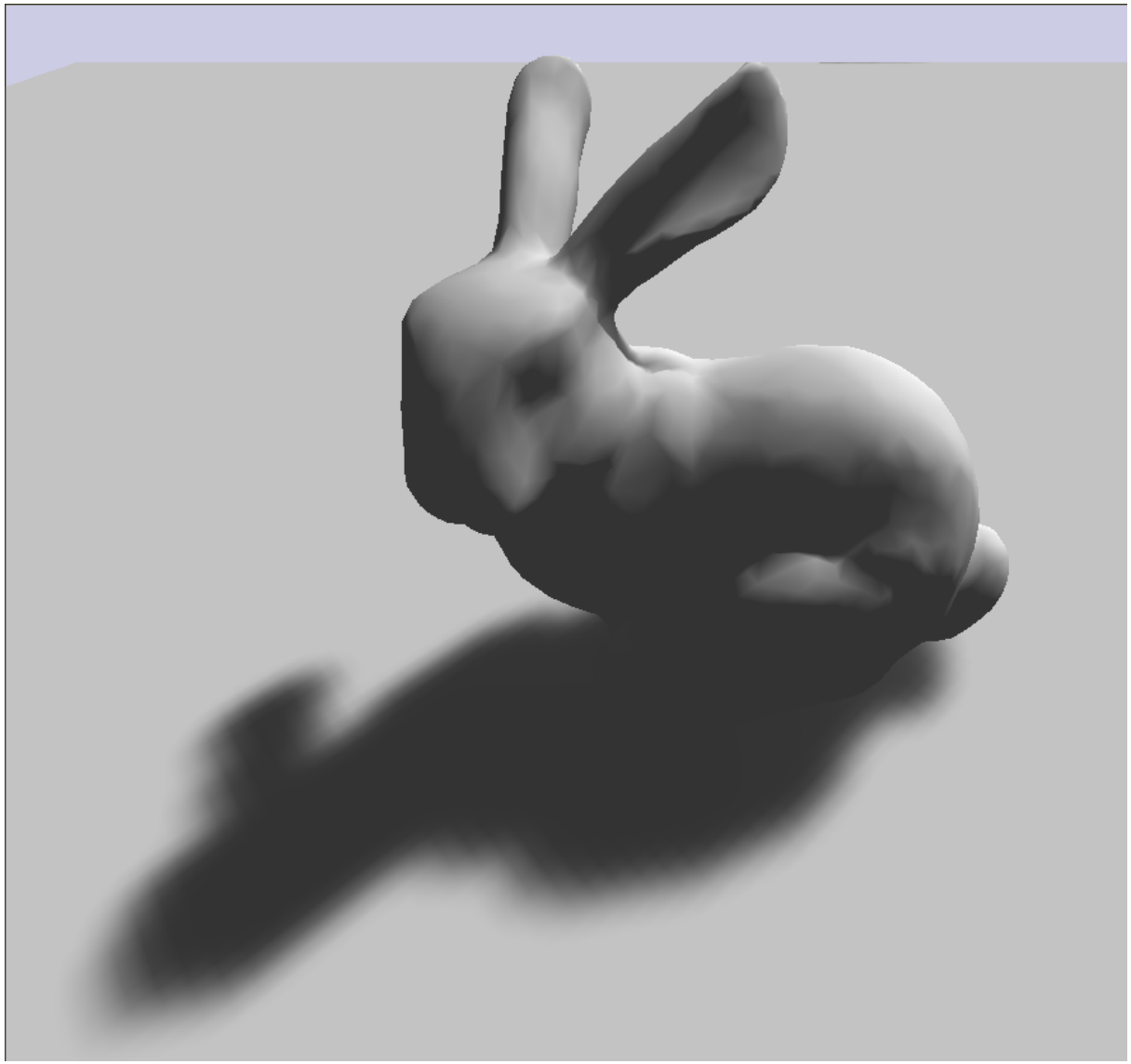
- Идея: функцию распределения можно аппроксимировать экспонентой
  $F(z) = \min(1, \exp(C \cdot (z_0 - z))) = \min(1, \exp(-Cz)\exp(Cz_0))$
  ($z$ – расстояние до освещаемого пикселя, $z_0$ – расстояние до источника тени)
- Интерполяция таких функций сводится к интерполяции $\exp(Cz_0)$
- Будем записывать в shadow map значение $\exp(Cz_0)$
- В шейдере будем умножать это значение на $\exp(-Cz)$
- Если результат больше единицы ($z < z_0$), принимаем освещённость за единицу



# ESM с линейной фильтрацией



# ESM с линейной фильтрацией и 7x7 размытием по Гауссу



# ESM

- $+$ Shadow map можно фильтровать (размывать, mipmaps, etc)
- $+$ Прост в реализации
- $-$ Требует floating-point буфер глубины или рендеринг в floating-point текстуру
- $-$ Константу $c$ приходится делать очень большой $\Rightarrow$ могут быть проблемы с точностью

# Variance shadow maps (VSM)

- Идея: запишем в shadow map мат.ожидание глубины и её квадрата

# Variance shadow maps (VSM)

- Идея: запишем в shadow map мат.ожидание глубины и её квадрата
- Их можно усреднять:

$$\int z\left[(1-t)p_1(z)+tp_2(z)\right]dz=(1-t)\int zp_1(z)dz+t\int zp_2(z)dz \tag{1}$$

- (аналогично для $z^2$)

# Variance shadow maps (VSM)

- Идея: запишем в shadow map мат.ожидание глубины и её квадрата
- Их можно усреднять:

$$\int z\left[(1-t)p_1(z)+tp_2(z)\right]dz=(1-t)\int zp_1(z)dz+t\int zp_2(z)dz \tag{1}$$

- (аналогично для $z^2$)
- Моделируем пиксель как дискретное распределение с единственным значением $\Rightarrow$ мат.ожидание глубины совпадает с её значением (и аналогично для квадрата глубины)

# Variance shadow maps (VSM)

- По мат.ожиданию глубины ($\mu$) и её квадрата можно вычислить дисперсию

$$\sigma^2 = \mathbb{E}[z^2] - \mathbb{E}[z]^2 \tag{2}$$

# Variance shadow maps (VSM)

- По мат.ожиданию глубины ($\mu$) и её квадрата можно вычислить дисперсию

$$\sigma^2 = \mathbb{E}[z^2] - \mathbb{E}[z]^2 \tag{2}$$

- По мат.ожиданию глубины и дисперсии можно оценить освещённость через одностороннее неравенство Чебышёва (оно же – неравенство Кантелли):

$$P(z) = \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + (z - \mu)^2} \tag{3}$$

# Variance shadow maps (VSM): алгоритм

- В shadow map записываем глубину и её квадрат (нужна текстура с 2 компонентами)

# Variance shadow maps (VSM): алгоритм

- В shadow map записываем глубину и её квадрат (нужна текстура с 2 компонентами)
- По желанию с результирующей текстурой shadow map производим фильтрацию (например, размытие)

# Variance shadow maps (VSM): алгоритм

- В shadow map записываем глубину и её квадрат (нужна текстура с 2 компонентами)
- По желанию с результирующей текстурой shadow map производим фильтрацию (например, размытие)
- В шейдере читаем shadow map, вычисляем $\mu$ и $\sigma^2$

# Variance shadow maps (VSM): алгоритм

- В shadow map записываем глубину и её квадрат (нужна текстура с 2 компонентами)
- По желанию с результирующей текстурой shadow map производим фильтрацию (например, размытие)
- В шейдере читаем shadow map, вычисляем $\mu$ и $\sigma^2$
- Если глубина нашего пикселя меньше $\mu$, освещённость равна 1

# Variance shadow maps (VSM): алгоритм

- В shadow map записываем глубину и её квадрат (нужна текстура с 2 компонентами)
- По желанию с результирующей текстурой shadow map производим фильтрацию (например, размытие)
- В шейдере читаем shadow map, вычисляем $\mu$ и $\sigma^2$
- Если глубина нашего пикселя меньше $\mu$, освещённость равна 1
- Иначе, вычисляем освещённость через неравенство Чебышёва

# Variance shadow maps (VSM): shadow bias

- VSM позволяет элегантно включить shadow bias

# Variance shadow maps (VSM): shadow bias

- VSM позволяет элегантно включить shadow bias
- Моделируем пиксель как параллелограмм с линейно меняющейся глубиной

# Variance shadow maps (VSM): shadow bias

- VSM позволяет элегантно включить shadow bias
- Моделируем пиксель как параллелограмм с линейно меняющейся глубиной
- Градиент глубины можно аппроксимировать с помощью `dFdx` и `dFdy` в шейдере

# Variance shadow maps (VSM): shadow bias

- VSM позволяет элегантно включить shadow bias
- Моделируем пиксель как параллелограмм с линейно меняющейся глубиной
- Градиент глубины можно аппроксимировать с помощью `dFdx` и `dFdy` в шейдере
- Итоговый квадрат глубины вычисляется как

$$z^2 + \frac{1}{4}\left[\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2\right] \tag{4}$$

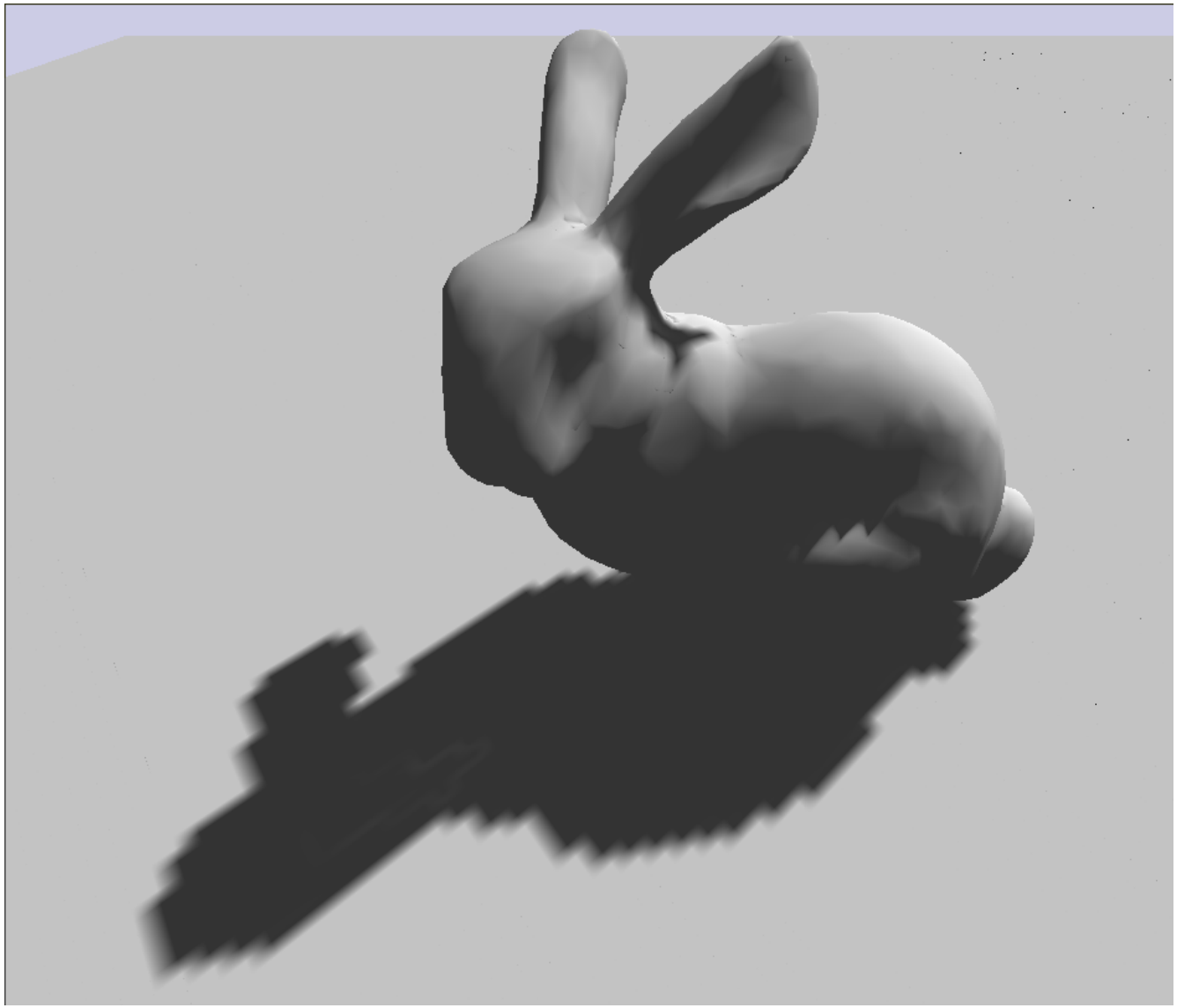
# Variance shadow maps (VSM): shadow bias

- VSM позволяет элегантно включить shadow bias
- Моделируем пиксель как параллелограмм с линейно меняющейся глубиной
- Градиент глубины можно аппроксимировать с помощью `dFdx` и `dFdy` в шейдере
- Итоговый квадрат глубины вычисляется как

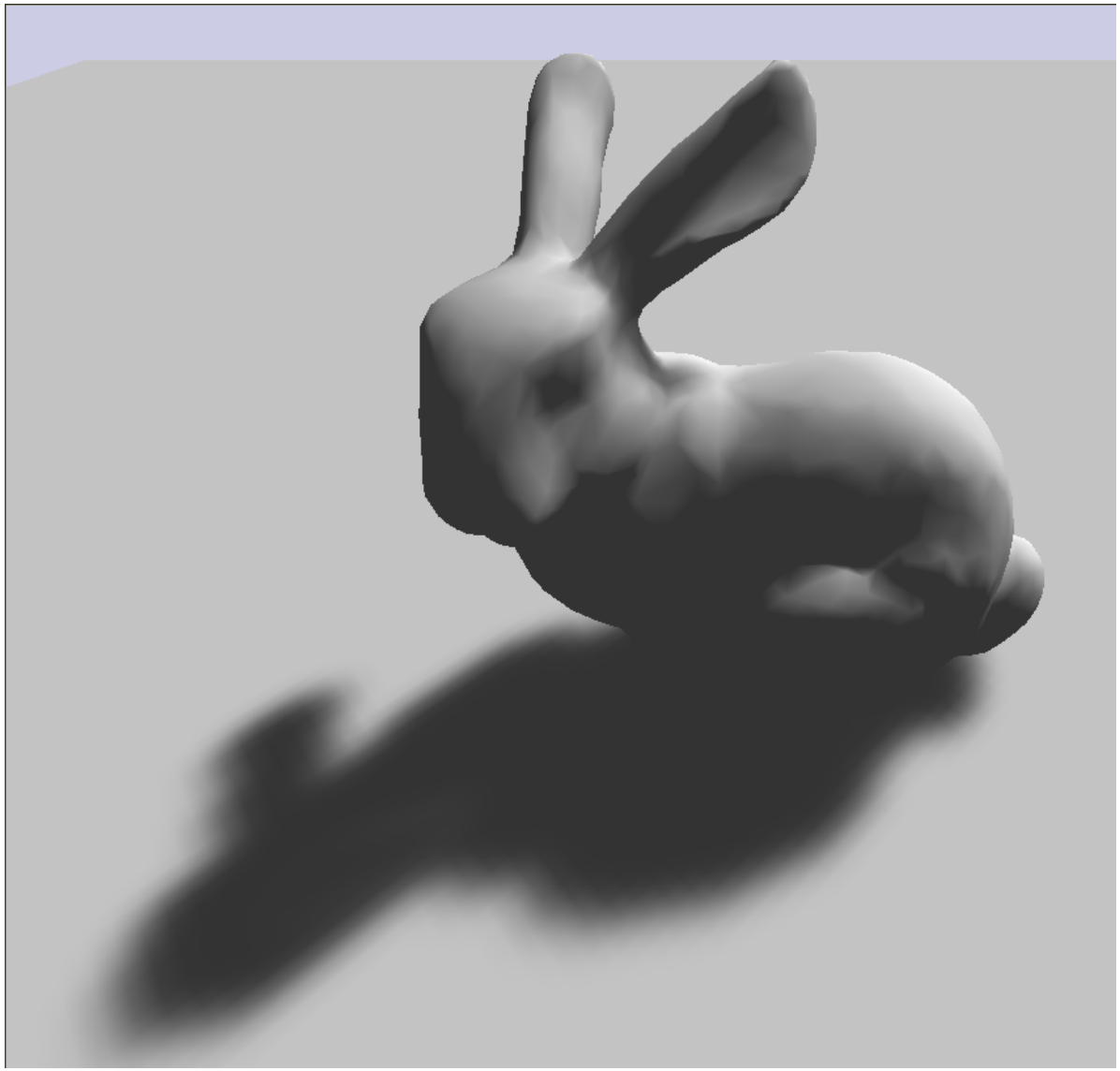
$$z^2 + \frac{1}{4}\left[\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2\right] \tag{4}$$

- Убирает *почти* все артефакты shadow acne

# VSM с линейной фильтрацией



# VSM с линейной фильтрацией и 7x7 размытием по Гауссу



# VSM

- + Shadow map можно фильтровать (размывать, mipmaps, etc)
- + Достаточно прост в реализации
- — Требует floating-point буфер глубины или рендеринг в floating-point текстуру
- — Возникает артефакт light bleeding

# Light bleeding

# Light bleeding

- Обычно возникает, когда $\sigma^2$ оказывается слишком большим (в близкие пиксели попали очень далёкие объекты)

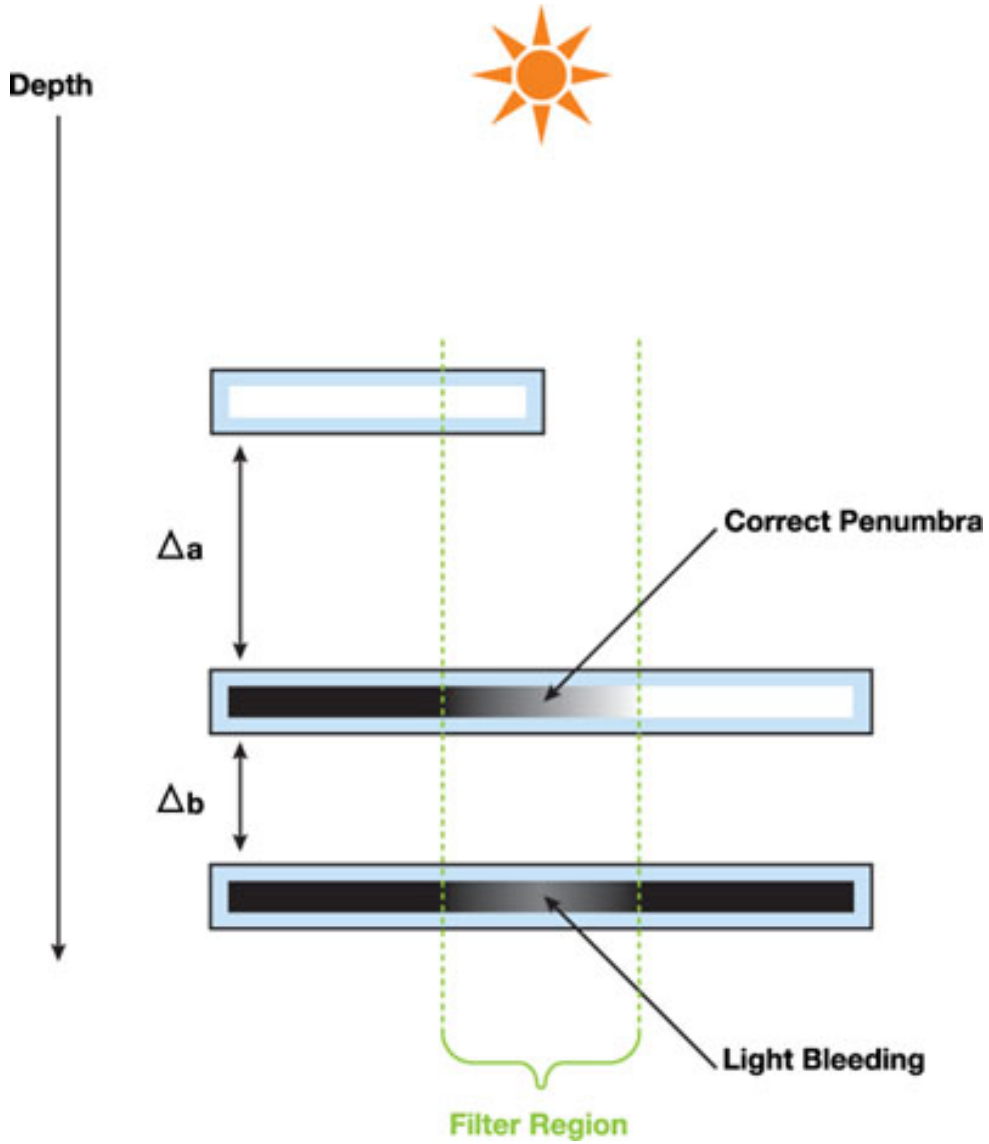
# Light bleeding

- Обычно возникает, когда $\sigma^2$ оказывается слишком большим (в близкие пиксели попали очень далёкие объекты)
- Можно исправить, трактуя маленькие значения коэффициента освещённости как нулевые, и преобразовав остальные значения в диапазон $[0, 1]$

# Light bleeding

- Обычно возникает, когда $\sigma^2$ оказывается слишком большим (в близкие пиксели попали очень далёкие объекты)
- Можно исправить, трактуя маленькие значения коэффициента освещённости как нулевые, и преобразовав остальные значения в диапазон $[0, 1]$
- Конкретные значения нужно подбирать в зависимости от сцены

# Light bleeding



# Convolution shadow maps (CSM)

- Записывает в shadow map коэффициенты преобразования Фурье от функции распределения

# Convolution shadow maps (CSM)

- Записывает в shadow map коэффициенты преобразования Фурье от функции распределения
- + Можно фильтровать (размывать, mipmaps, etc)
- — Сложнее в реализации
- — Требует многокомпонентных буферов (часто до 16 компонент на пиксель)
- — Возникают ringing-артефакты (см. Gibbs phenomenon)

# Ссылки

- ogldev.org/www/tutorial42/tutorial42.html
- learnopengl.com/Advanced-Lighting/Shadows/Shadow-Mapping
- docs.microsoft.com/en-us/windows/win32/dxtecharts/common-techniques-to-improve-shadow-depth-maps
- Оригинальная статья про ESM
- Оригинальная статья про VSM
- Улучшения VSM, включая более реалистичные мягкие тени

# Тени на больших сценах

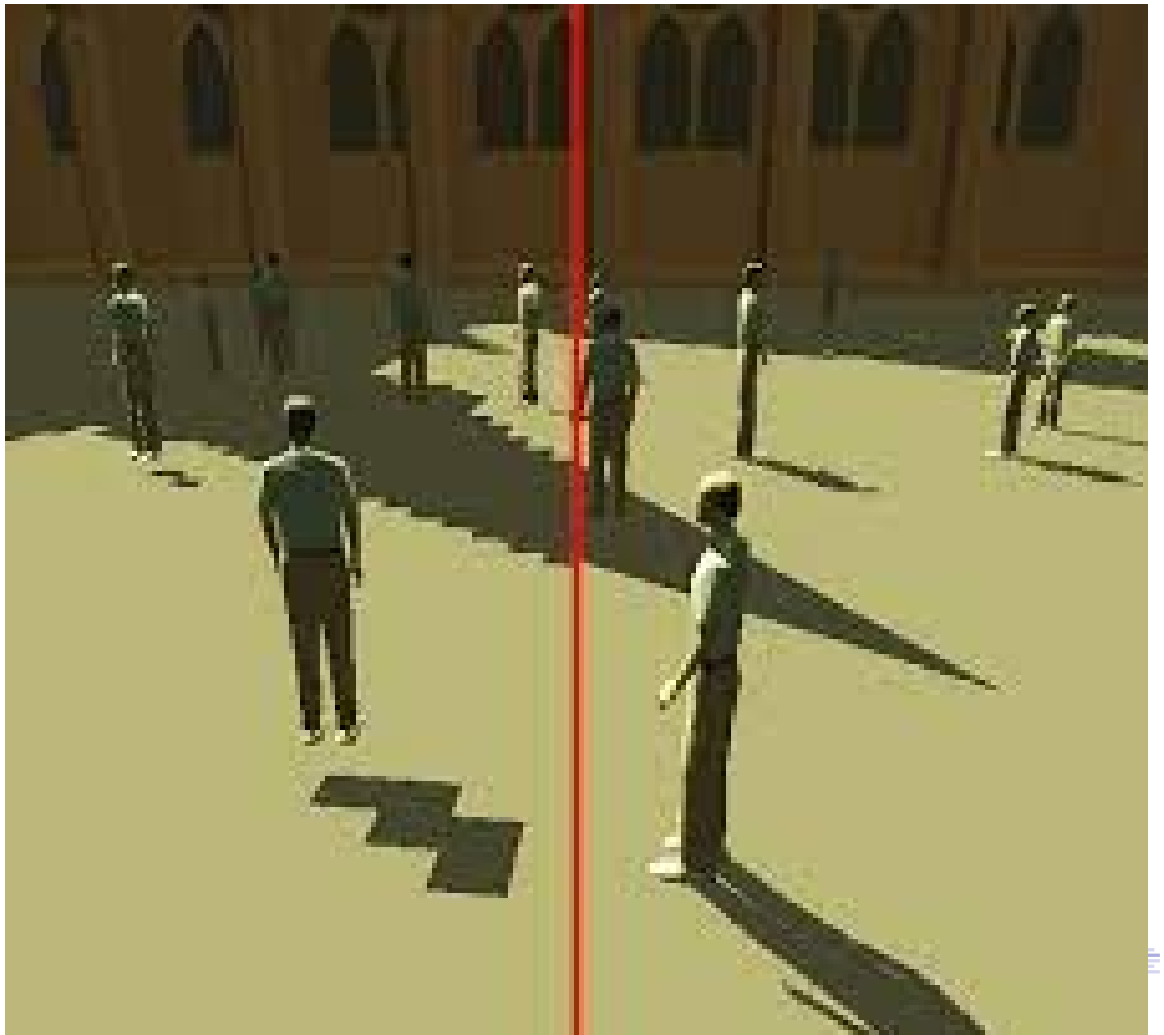
- Если сцена очень большая, даже огромных (8k) shadow map текстур с хорошим сглаживанием может не хватить

# Тени на больших сценах

- Если сцена очень большая, даже огромных (8k) shadow map текстур с хорошим сглаживанием может не хватить
- Классически есть два решения:
  - Использовать неравномерное соответствие пикселей shadow map и объектов в мире
  - Использовать более одной shadow map

# Perspective shadow maps (PSM)

- При генерации shadow map помимо обычного преобразования вершин применяет ещё перспективное преобразование так, чтобы больше пикселей shadow map приходилось на близкие к камере объекты

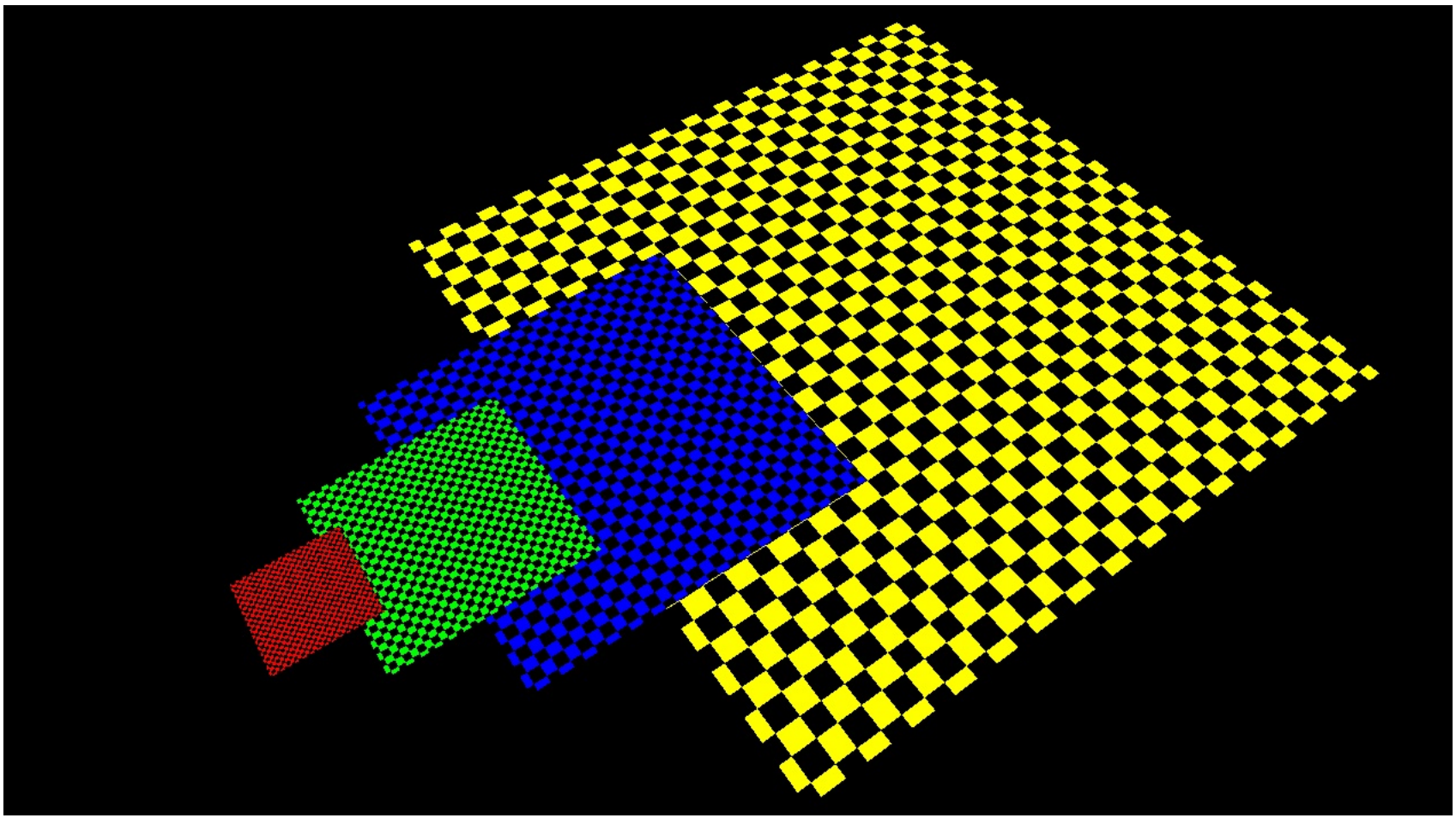


# Perspective shadow maps (PSM)

- + Часто решает проблему точности shadow map
- — Сложен в реализации
- — Очень много худших случаев (например, камера смотрит на источник света), в которых алгоритм почти не работает

# Cascaded shadow maps (CSM)

- Будем использовать несколько shadow maps (cascades): одну – для ближайших объектов, другую – для объектов на среднем расстоянии, третью – для далёких объектов, и т.п.



# Cascaded shadow maps (CSM)

- + Прост в реализации
- + Легко комбинировать с VSM/ESM/etc
- — Большой расход памяти
- — Нужно аккуратно обработать переход между разными каскадами
- Самый часто использующийся сегодня алгоритм, поддерживается большинством движков

# Shadow mapping: ссылки

- Оригинальная статья про PSM
- PSM + улучшения
- Статья про CSM
- ogldev.org/www/tutorial49/tutorial49.html
- learnopengl.com/Guest-Articles/2021/CSM

# Ambient occlusion

- Ambient освещение светит ‘отовсюду’ – эвристическая аппроксимация многократных отражений в уравнении рендеринга

# Ambient occlusion

- Ambient освещение светит ‘отовсюду’ – эвристическая аппроксимация многократных отражений в уравнении рендеринга
- Это свет, значит от него может быть тень

# Ambient occlusion

- Ambient освещение светит ‘отовсюду’ – эвристическая аппроксимация многократных отражений в уравнении рендеринга
- Это свет, значит от него может быть тень
- Какие-то части сцены получают больше ambient света, какие-то – меньше

# Ambient occlusion

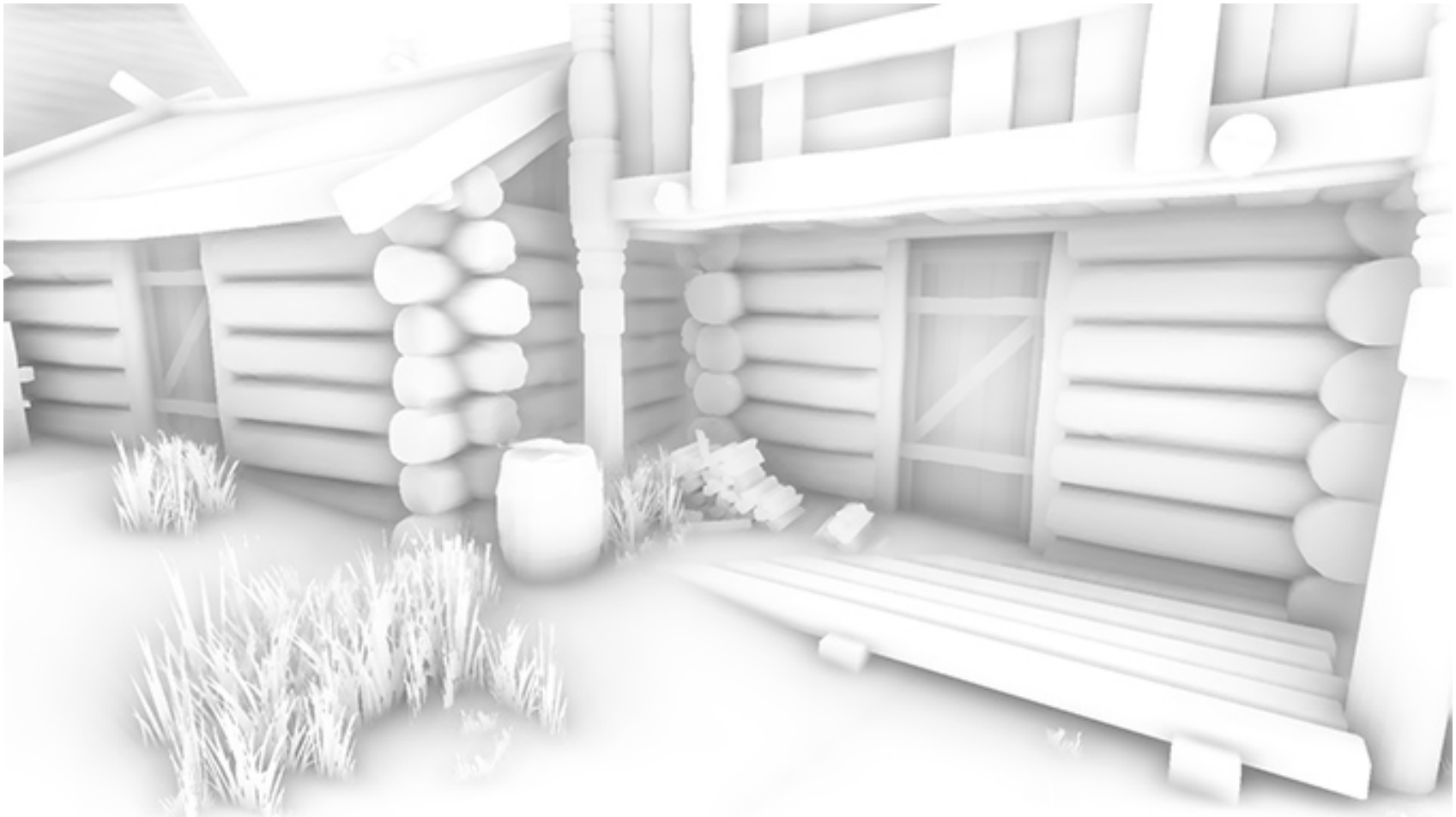
- Ambient освещение светит ‘отовсюду’ – эвристическая аппроксимация многократных отражений в уравнении рендеринга
- Это свет, значит от него может быть тень
- Какие-то части сцены получают больше ambient света, какие-то – меньше
- Обычно затеняются углы, углубления, трещины, стыки объектов, и т.п.

# Ambient occlusion

- Ambient освещение светит ‘отовсюду’ – эвристическая аппроксимация многократных отражений в уравнении рендеринга
- Это свет, значит от него может быть тень
- Какие-то части сцены получают больше ambient света, какие-то – меньше
- Обычно затеняются углы, углубления, трещины, стыки объектов, и т.п.
- Очень сильно увеличивает реализм изображения

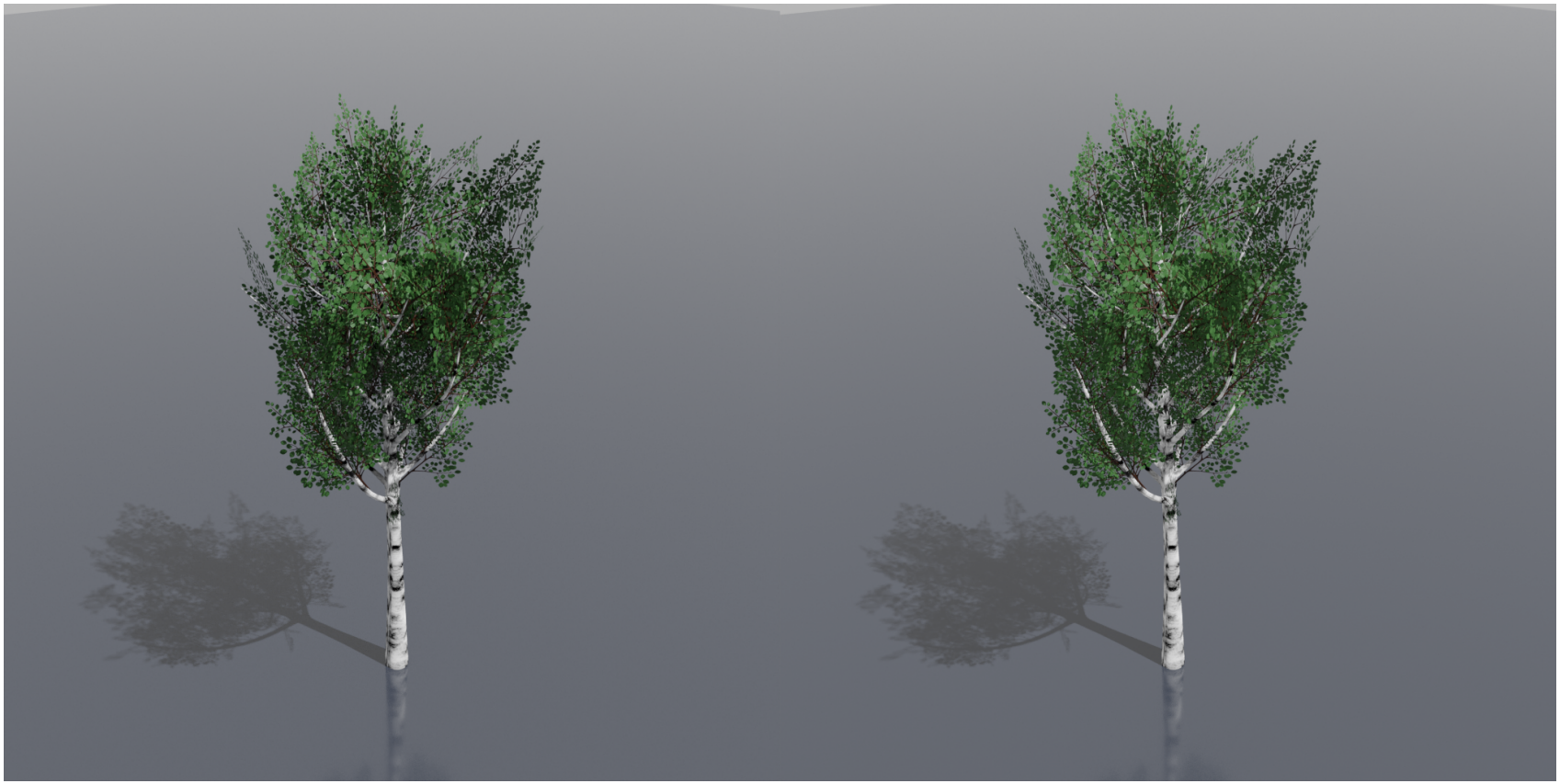
# Ambient occlusion (Crysis, 2007)

# Ambient occlusion



# Ambient occlusion

# Ambient occlusion



# Ambient occlusion: алгоритмы

- Baking: предподсчитать ambient occlusion для модели, записать её в одноканальную текстуру и использовать в шейдере как множитель при ambient освещении

# Ambient occlusion: алгоритмы

- Baking: предподсчитать ambient occlusion для модели, записать её в одноканальную текстуру и использовать в шейдере как множитель при ambient освещении
  - \+ Быстро работает
  - — Не учитывает occlusion между разными объектами
  - — Не работает для анимированных объектов

# Ambient occlusion

Original model

With ambient occlusion

Extracted ambient occlusion map

# Baking

- Записывание предподсчитанных свойств объектов в текстуры в общем случае называется baking (запеканием)

# Baking

- Записывание предподсчитанных свойств объектов в текстуры в общем случае называется baking (запеканием)
- Все 3D-редакторы умеют запекать нормали, ambient occlusion, и многое другое

# Ambient occlusion: алгоритмы

- Вычислять ambient occlusion на лету, используя какие-нибудь эвристики (алгоритмы SSAO, HBAO, HBAO+, HDAO, VXAO, ...)

# Ambient occlusion: алгоритмы

- Вычислять ambient occlusion на лету, используя какие-нибудь эвристики (алгоритмы SSAO, HBAO, HBAO+, HDAO, VXAO, ...)
  - \+ Работает с любыми сценами
  - — Сложнее в реализации
  - — Медленее работает
  - — Обычно требуют подгона параметров под сцену

# SSAO (Crytek, 2007)

- Screen-space ambient occlusion (SSAO) – один из первых real-time алгоритмов для генерации ambient occlusion

# SSAO (Crytek, 2007)

- Screen-space ambient occlusion (SSAO) – один из первых real-time алгоритмов для генерации ambient occlusion
- Термин ‘screen-space’ означает, что алгоритм использует только те данные, которые попадают на экран в процессе рендеринга (т.е. не использует саму исходную геометрию, не использует рендеринг в текстуру с другого ракурса, и т.п.)

# SSAO (Crytek, 2007)

- Screen-space ambient occlusion (SSAO) – один из первых real-time алгоритмов для генерации ambient occlusion
- Термин ‘screen-space’ означает, что алгоритм использует только те данные, которые попадают на экран в процессе рендеринга (т.е. не использует саму исходную геометрию, не использует рендеринг в текстуру с другого ракурса, и т.п.)
- Идея: вычислим пересечение полусферы некоторого радиуса в освещаемой точке с окружающей геометрией, объём этого пересечения – аппроксимация ambient occlusion (чем больше вокруг пикселя других объектов, тем слабее он освещён)

# SSAO (Crytek, 2007)

# SSAO

- Вычислять настоящее пересечение – дорого, вместо этого аппроксимируем его монте-карло интегрированием: возьмём набор случайных точек в полусфере вокруг освещаемой точки и сравним их глубину со значением из Z-буффера

# SSAO

- Вычислять настоящее пересечение – дорого, вместо этого аппроксимируем его монте-карло интегрированием: возьмём набор случайных точек в полусфере вокруг освещаемой точки и сравним их глубину со значением из Z-буффера
- Обычно набор случайных точек фиксирован, передаётся в виде небольшой текстуры, где в цветах пикселей записаны координаты точек (относительно исходной точки)

# SSAO

- Вычислять настоящее пересечение – дорого, вместо этого аппроксимируем его монте-карло интегрированием: возьмём набор случайных точек в полусфере вокруг освещаемой точки и сравним их глубину со значением из Z-буффера
- Обычно набор случайных точек фиксирован, передаётся в виде небольшой текстуры, где в цветах пикселей записаны координаты точек (относительно исходной точки)
- Использование везде одного и того же набора точек приводит к *banding*-у

# SSAO banding

- Banding – ситуация, когда хорошо видна дискретизация цветов

# SSAO banding

- Banding – ситуация, когда хорошо видна дискретизация цветов
- В SSAO источник banding'а – монте-карло интегрирование: отношение $\frac{K}{N}$ (K – количество видимых точек, N – всех точек) может принимать небольшой набор (N+1) дискретных значений

# SSAO banding

- Banding – ситуация, когда хорошо видна дискретизация цветов
- В SSAO источник banding'а – монте-карло интегрирование: отношение $\frac{K}{N}$ (K – количество видимых точек, N – всех точек) может принимать небольшой набор (N+1) дискретных значений
- Можно вращать набор случайных точек вокруг нормали освещаемой точки на угол, случайный для каждого освещаемого пикселя (угол тоже передаётся какой-нибудь текстурой)

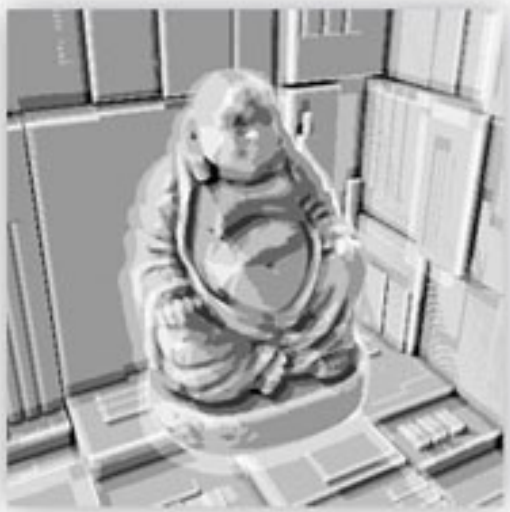
# SSAO banding

- Banding – ситуация, когда хорошо видна дискретизация цветов
- В SSAO источник banding'а – монте-карло интегрирование: отношение $\frac{K}{N}$ (K – количество видимых точек, N – всех точек) может принимать небольшой набор (N+1) дискретных значений
- Можно вращать набор случайных точек вокруг нормали освещаемой точки на угол, случайный для каждого освещаемого пикселя (угол тоже передаётся какой-нибудь текстурой)
- Приводит к 'шуму' в изображении, который менее заметен и который можно размыть

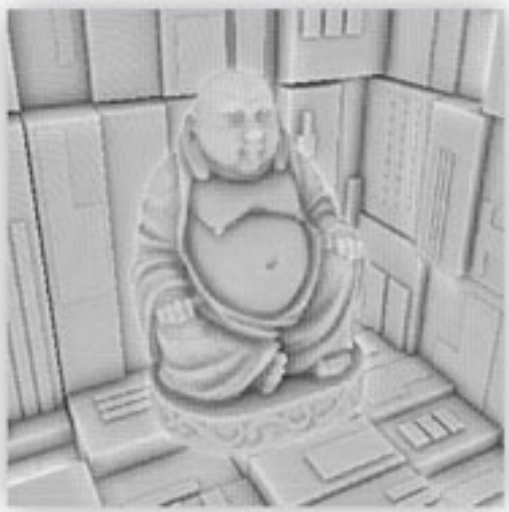
# SSAO banding

- Banding – ситуация, когда хорошо видна дискретизация цветов
- В SSAO источник banding'а – монте-карло интегрирование: отношение $\frac{K}{N}$ (K – количество видимых точек, N – всех точек) может принимать небольшой набор (N+1) дискретных значений
- Можно вращать набор случайных точек вокруг нормали освещаемой точки на угол, случайный для каждого освещаемого пикселя (угол тоже передаётся какой-нибудь текстурой)
- Приводит к 'шуму' в изображении, который менее заметен и который можно размыть
- Разменять banding на шум – классический приём real-time графики

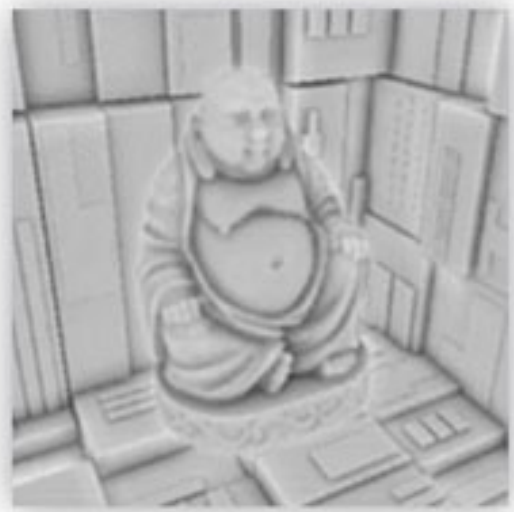
# SSAO banding



low sample 'banding'



random rotation = noise



+ blur = acceptable

# SSAO: ссылки

- Оригинальная статья про SSAO
- learnopengl.com/Advanced-Lighting/SSAO