

Компьютерная графика: Дополнительные главы

Лекция 5-II: Технологии теней

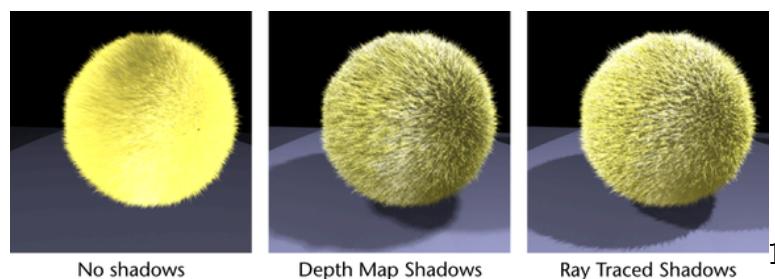
Н.Д. Смирнова

Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет

20.03.2011

О тенях

- самый важный визуальный эффект, влияющий на реалистичность
- дают возможность оценить глубину сцены
- ощутить взаимное расположение объектов



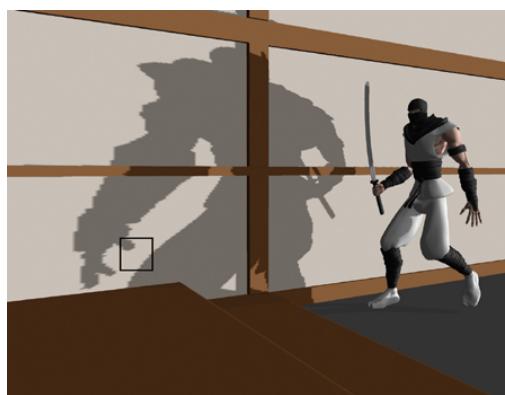
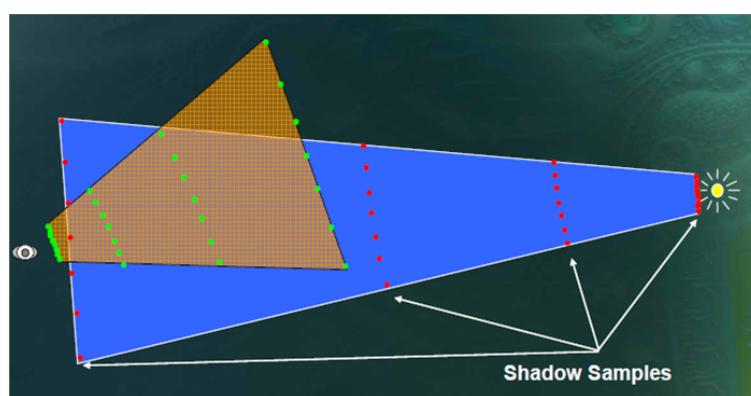
1

¹<http://download.autodesk.com/us/maya/2010help/>

Современные технологии

- основаны на теневых буферах для всей сцены
- два направления работ:
 - повышение разрешения при сохранении постоянного размера теневой текстуры
 - имитация мягких теней

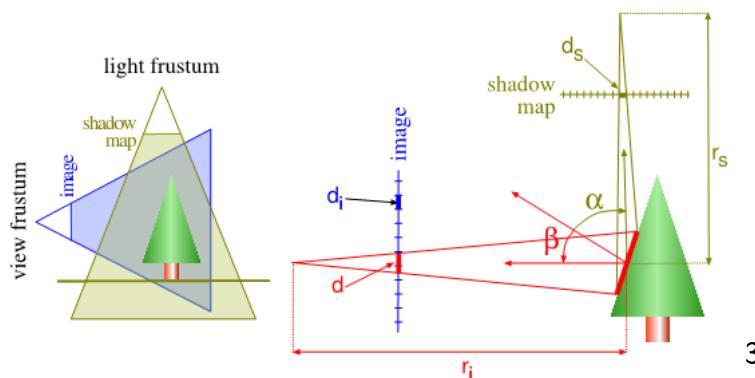
Aliasing



2

Aliasing. Математика

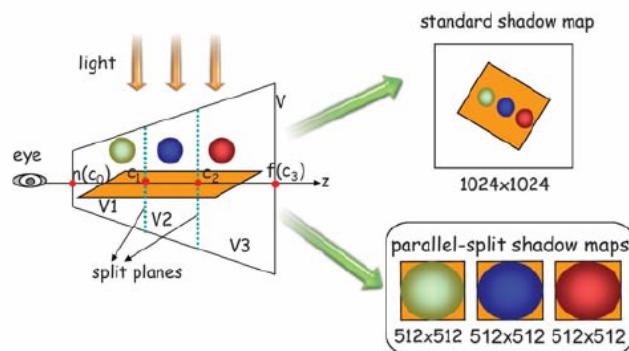
$$d = d_s \frac{r_s}{r_i} \frac{\cos \beta}{\cos \alpha}$$



³Stamminger, M., and Drettakis, G. 2002. Perspective shadow maps. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002, ACM Press/ ACM SIGGRAPH, J. Hughes, Ed., Annual Conference Series

Cascaded Shadow Maps (CSM)

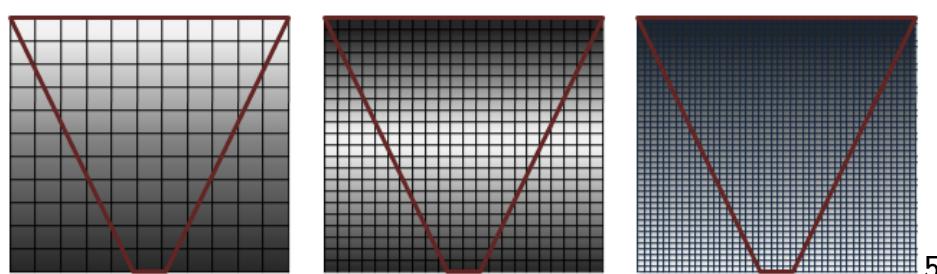
- aka Parallel-Split Shadow Maps ⁴
- view frustum делится на части
- для каждой части свой shadow map



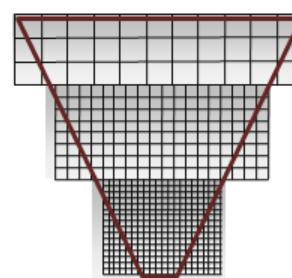
⁴http://http.developer.nvidia.com/GPUGems3/gpugems3_ch10.html

CSM. Борьба с aliasing

мапы для разных частей view frustum'a



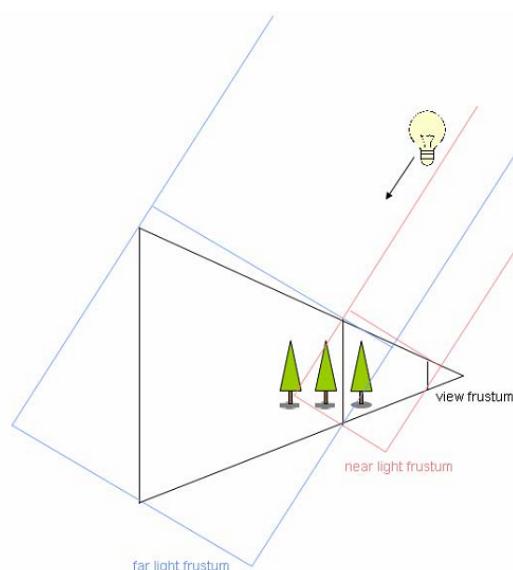
результат использования разных мапов



⁵[http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ee416307\(v=vs.85\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ee416307(v=vs.85).aspx)

CSM. Общий случай

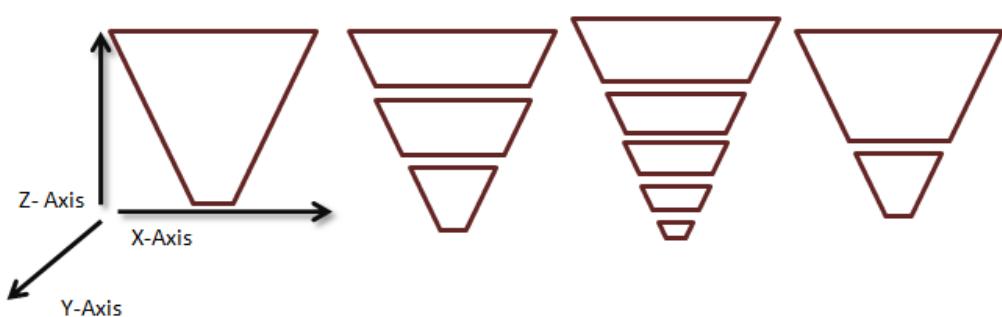
в каждый мап рендерится геометрия из соответствующей части сцены



6

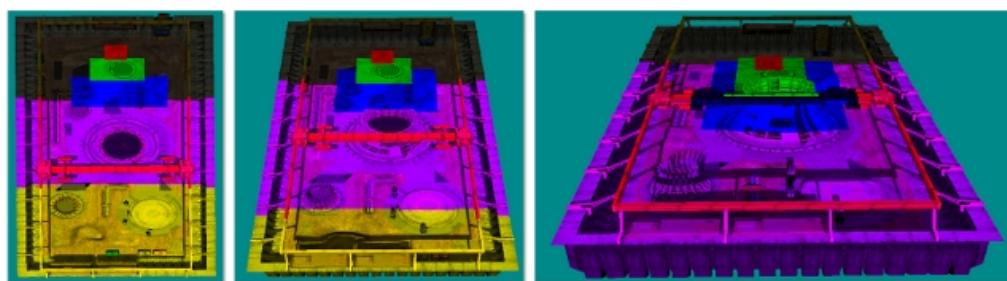
CSM. Выбор разделяющих плоскостей

- фиксированный (общепринят)
- переменный (приводит к дрожанию при движении камеры)
- зависит от сцены



CSM. Выбор разделяющих плоскостей

- зависит от направлений взгляда и освещения
- чем ближе направления, тем больше перекрываются карты



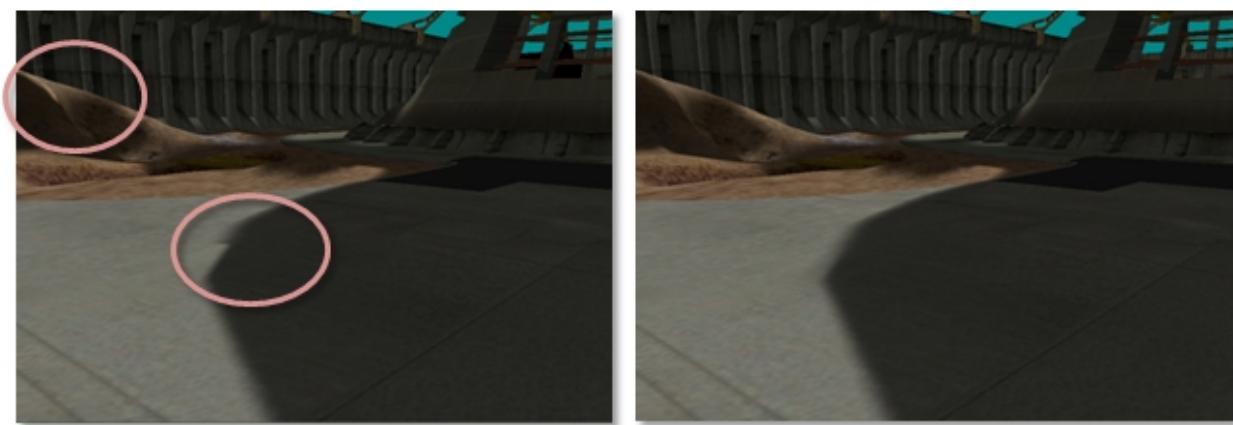
CSM. Куски сцены

- вложенные subfrustum'ы $f_{near} = const$
 - лучше подходит для движущейся камеры
- неперекрывающиеся subfrustum'ы
 - не рендерим лишнее

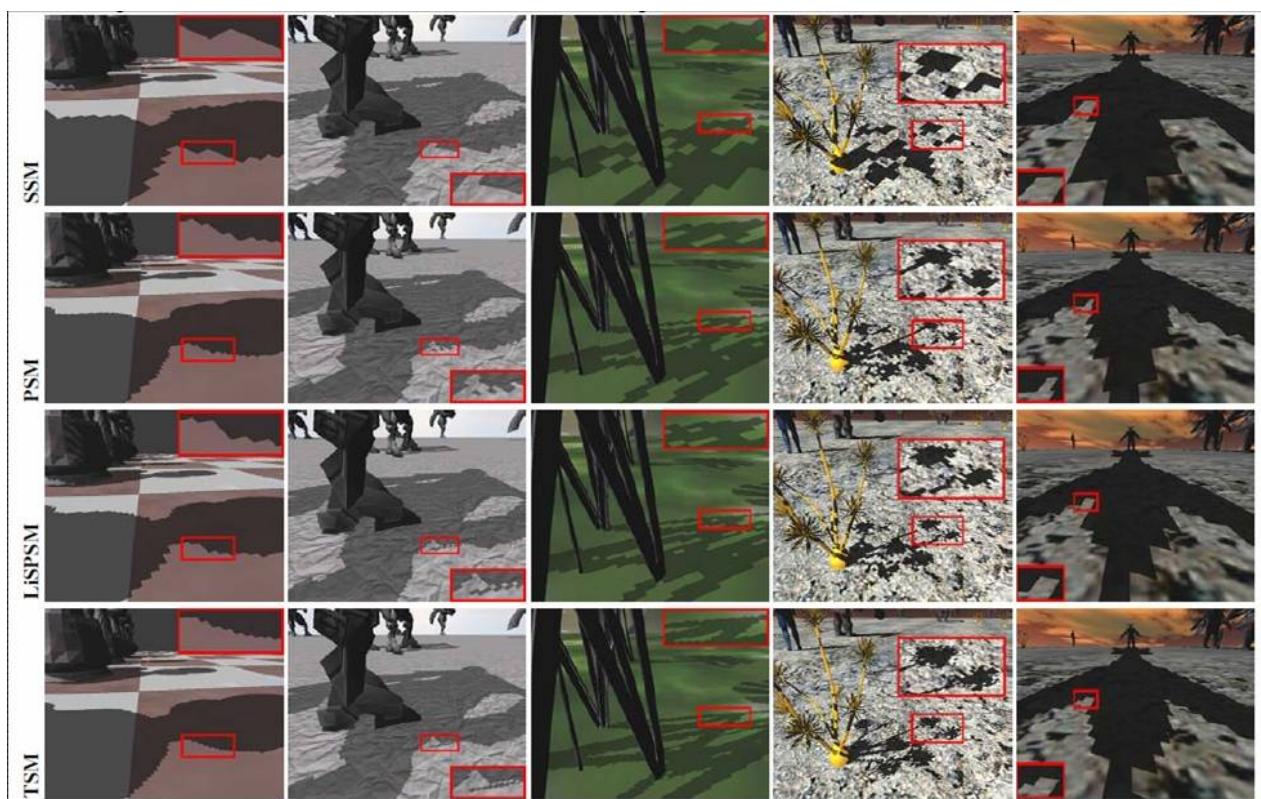


CSM. Проблемы на границе

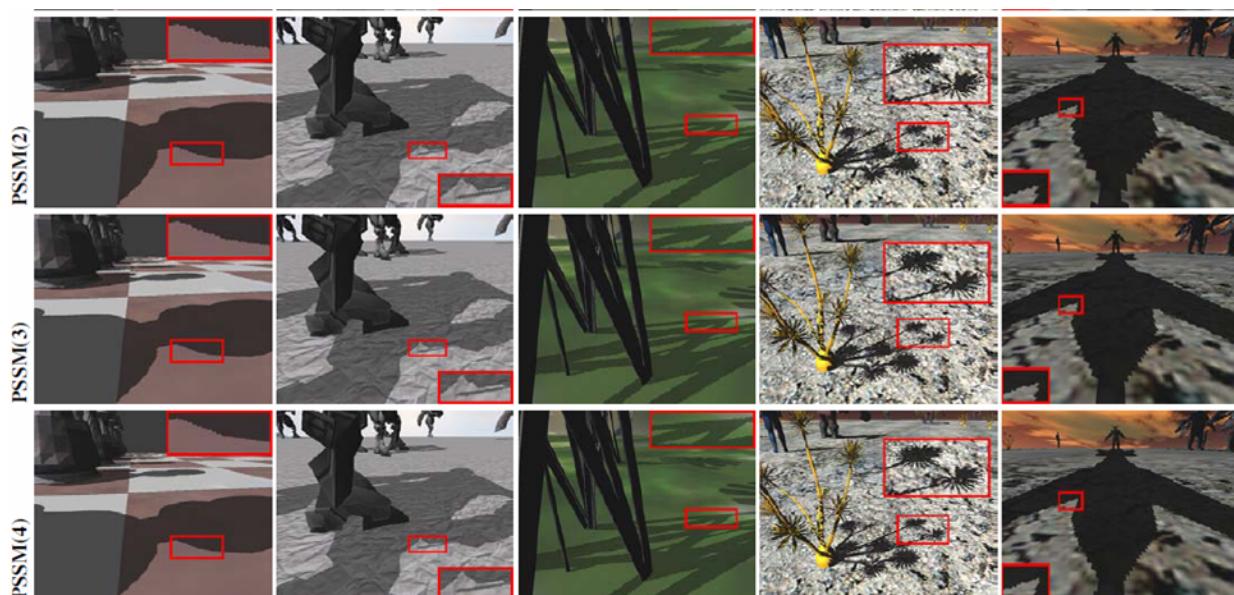
- делают плавный переход между разными mapами



CSM. Сравнение

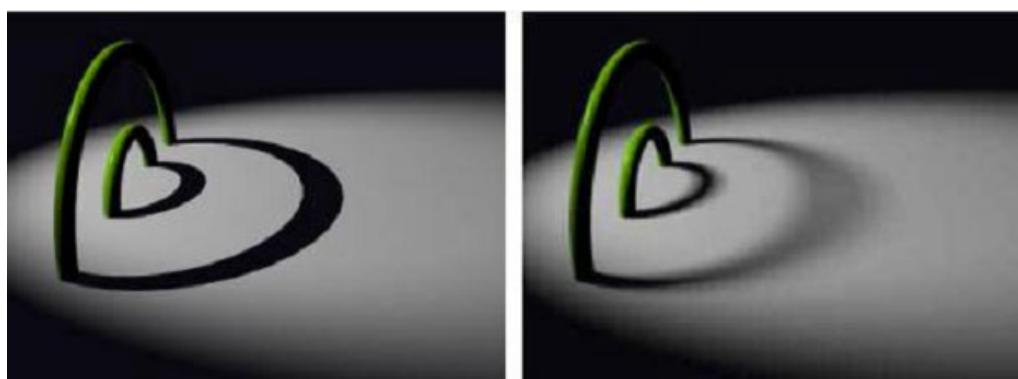


CSM. Сравнение



Мягкие тени

- в природе не бывает четких теней
- смягчим тени - уменьшим aliasing
- будем фильтровать

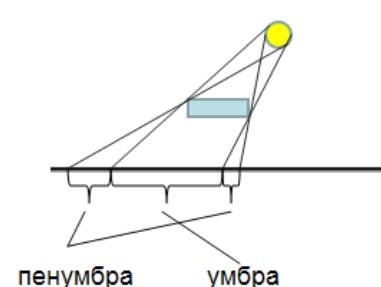
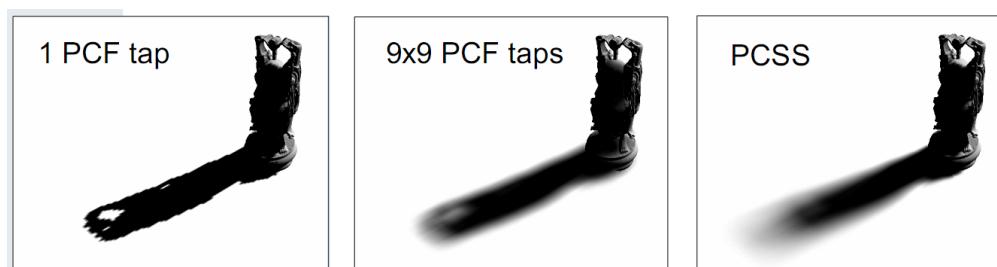


7

⁷http://www.cs.utexas.edu/~fussell/courses/cs384g/projects/raytracing/ray_examples/

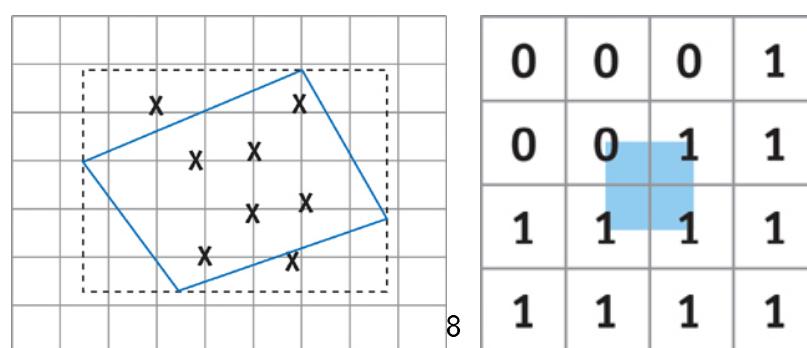
Мягкие тени

- фиксированная пенумбра
- переменная пенумбра



Percentage close-filtering (PCF)

- фильтровать shadow map нельзя
- PCF фильтрует результат сравнения z вместо $depth < \text{average}(\text{tex}_{\text{depth}})$
надо $\text{average}(\text{depth} < \text{tex}_{\text{depth}})$
- поддерживается железом DX10, DX11: 2x2 - маловато



⁸http://http.developer.nvidia.com/GPUGems/gpugems_ch11.html

PCF. Ядра фильтрации большого размера

- руками можно сделать ядра фильтрации любого размера
- много обращений в текстуру?
 - сэмплы рядом → производительность лучше ожидаемой

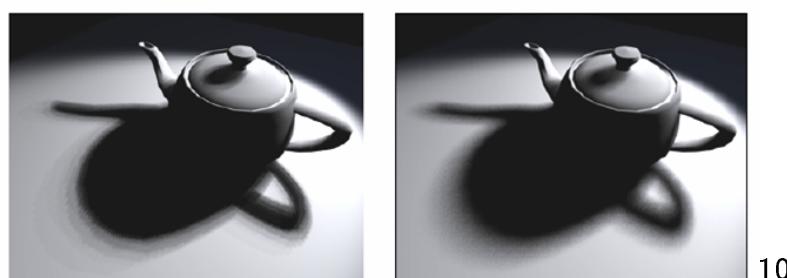


9

⁹http://http.developer.nvidia.com/GPUGems/gpugems_ch11.html

PCF. Большой размер. Проблемы

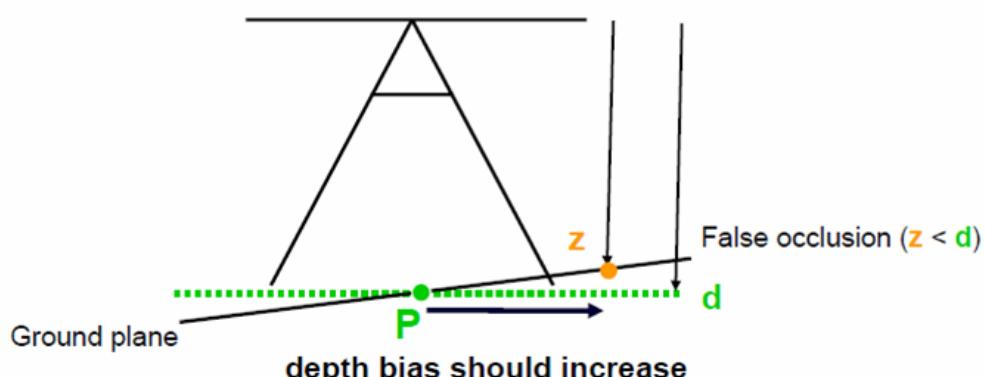
- регулярные ядра → образование полос
 - специальные нерегулярные ядра: замена полос на шум
- большие ядра (7×7 и далее) → слишком много обращений в текстуру
- при этом фильтрация происходит только на границе свет-тень
 - по внешним сэмплам определять факт полной затененности/освещенности
 - использовать иерархические теневые min-max карты (???)



¹⁰Louis Bavoil. Advanced Soft Shadow Mapping Techniques. NVIDIA

PCF. Проблема замозатенения

- традиционно: пишем $z + bias$ в shadow map
- $bias = constant\ bias + slope-based\ bias$
- для больших ядер PCF может потребоваться очень большой bias



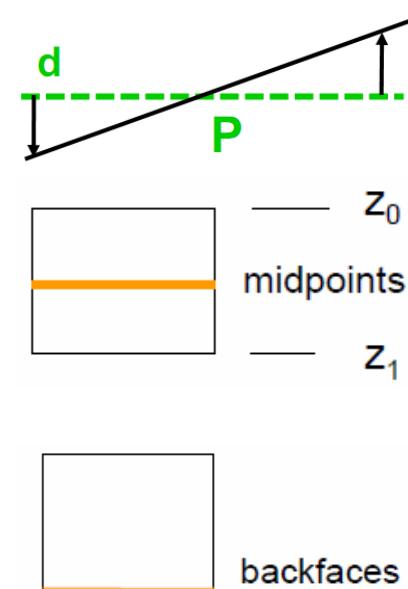
PCF. Проблема замозатенения

- Использование градиента глубины $\text{float2}(dz/du, dz/dv)$
- Рендеринг средних точек
 - $z = (z_0 + z_1)/2$ (2 рендера)
 - нужен bias для тонких объектов
- Рендеринг только обратных поверхностей
 - только для закрытых объектов
 - "протекание" света для больших ядер

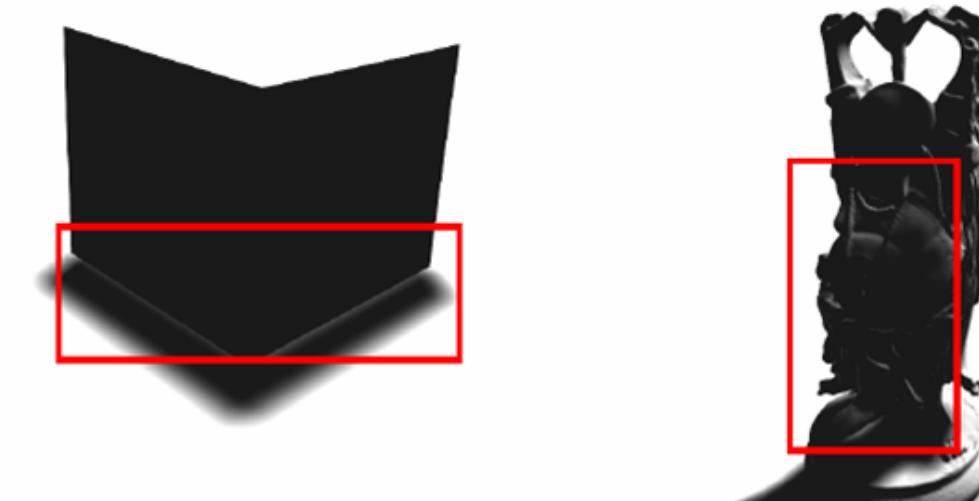
11 12

¹¹Christian Schueler, "Normal Mapping without Pre-Computed Tangents", ShaderX5

¹²John Isidoro, "Shadow Mapping: GPU-based Tips and Techniques", GDC 2006



PCF. Протекание света



Variance Shadow Maps (VSM)

- PCF затененность = кол-во затененных сэмплов / общее число сэмплов
- можно получить величину полутени, если рассмотреть значения глубины, рядом с интересующей нас точкой, как набор значений некоторой случайно величины¹³
- воспользуемся неравенством Чебышева, чтобы оценить вероятность точки быть освещенной $P(d < z)$

$$P(z \geq d) \leq p_{max}(d) \equiv \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + (d - \mu)^2}, (d < \mu)$$

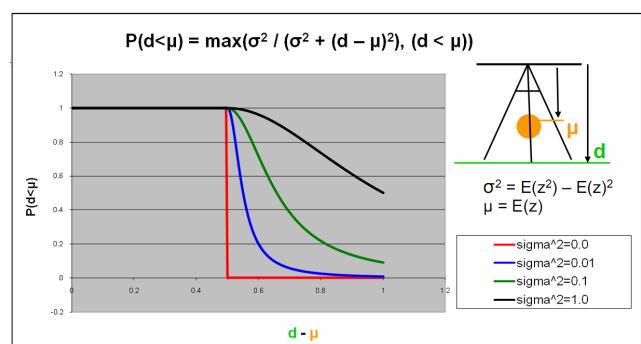
(становится равенством для плоских объектов)

¹³Donnelly William, Andrew Lauritzen. Variance Shadow Maps.

<http://www.punkuser.net/vsm/>

VSM. Неравенство Чебышева

- $P(z \geq d) \leq p_{max}(d) \equiv \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + (d - \mu)^2}$
- $\mu = E(z) = M_1$
- $\sigma^2 = E(z^2) - E(z)^2 = M_2 - M_1$
- $M_1 = E(z) = \int_{-\infty}^{\infty} z p(z) dz$
- $M_2 = E(z^2) = \int_{-\infty}^{\infty} z^2 p(z) dz$



14

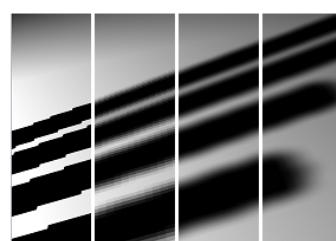
¹⁴Louis Bavoil. Advanced Soft Shadow Mapping Techniques. NVIDIA Developer Technology

VSM. Рендеринг

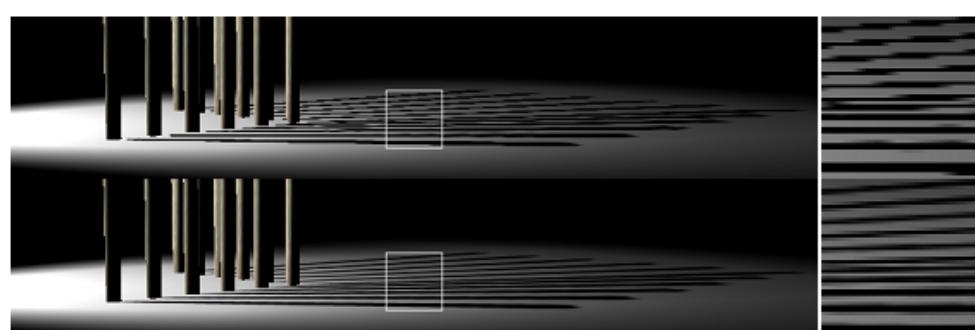
- в FP16x2 или FP32x2 рендерить z и z^2
- полученную текстуру зафильтровать Гауссом в 2 прохода (вертикально и горизонтально) получив $E(z)$ и $E(z^2)$
- для текстуры построить мипмапы или использовать анизотропную фильтрацию
- при выборке из текстуры:
 - незатененный пиксель, если $d < z$
 - иначе коэффициент $\sigma^2 / (\sigma^2 + (d - \mu))^2$, $d \geq z$
 - σ^2 для борьбы с ошибками самозатенения

VSM. Чего добились?

слева направо: standard; 5x pcf; 5x bilinear pcf; vsm 5x gaussian filtering

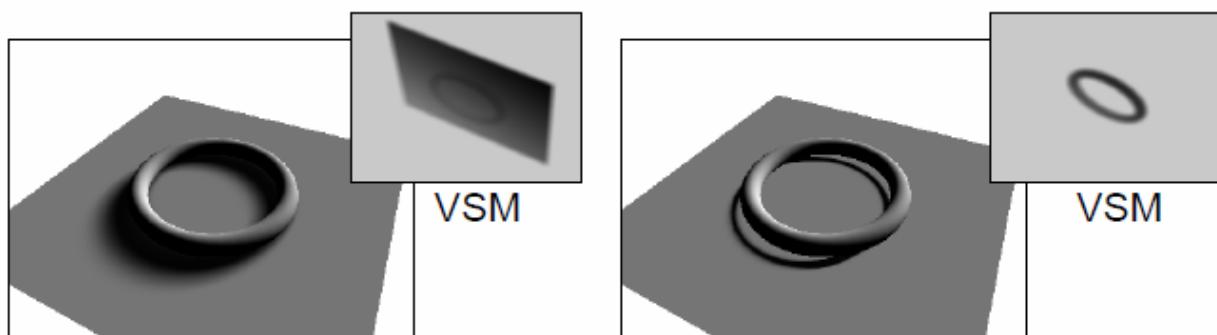


наверху: shadow maps + pcf; внизу: vsm + 16x aniso-filtering



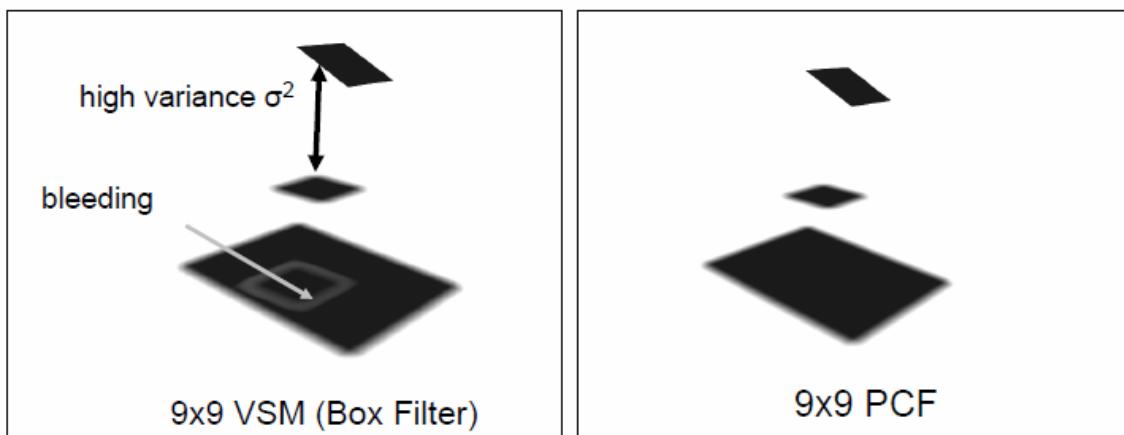
VSM. Ресиверы

ресиверы должны присутствовать в теневой карте



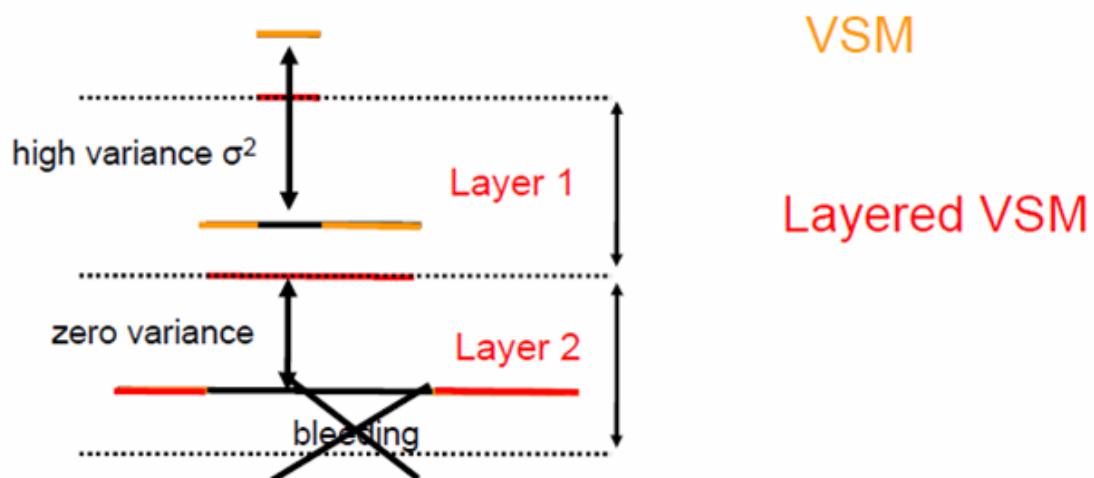
VSM. Color bleeding

"протекание" света за счет больших перепадов z и, следовательно, σ^2



Layerd VSM

разделение светового фростума на N слоев с ограничением глубины внутри слоя ¹⁵



¹⁵ Andrew Lauritzen, Michael McCool, Layered Variance Shadow Maps.

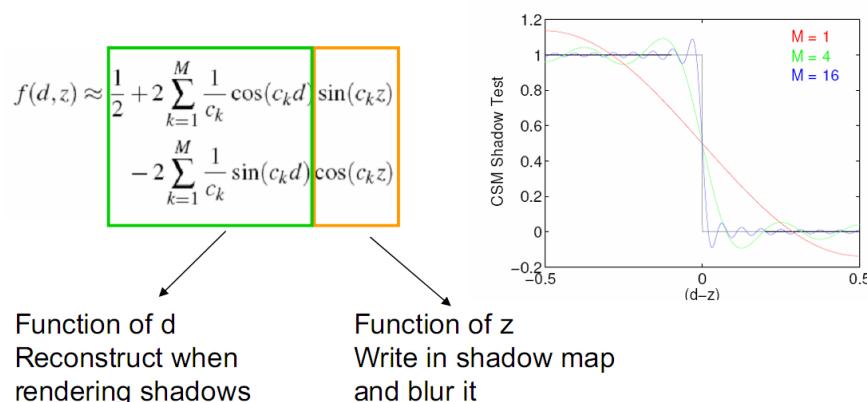
Layerd VSM. Помогло?

- сокращает или вообще убирает "протекание" света
- не требуется FP32x2
- все еще требуется один проход для генерации
- используется только 1 sample per pixel



Convolution Shadow Maps (CSM)

- ступенчатая функция shadow map: $f(d, z) = 0$ если $d > z$, иначе 1
- $f(d, z) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i(d) B_i(z)$
- возможно произвести фильтрацию $B_i(z)$
- CSM представляет $f(d, z)$ в виде ряда Фурье ($d, z \in [0, 1]$)
¹⁶



¹⁶T. Annen, T. Mertens, P. Bekaert, H.-P. Seidel, J. Kautz, "Convolution Shadow Maps", ГГСД, 2007

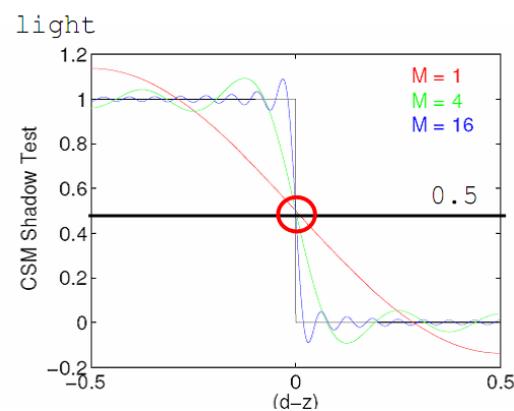
CSM. Построение мапа

- запись идет с помощью MRT в текстуры формата R8G8B8A8_UNORM
 - для $M = 8$ необходимо MRT4
- после этого текстуры фильтруются
 - ну и генерируются mipмапы, если надо
- CSM чистится 1.0f

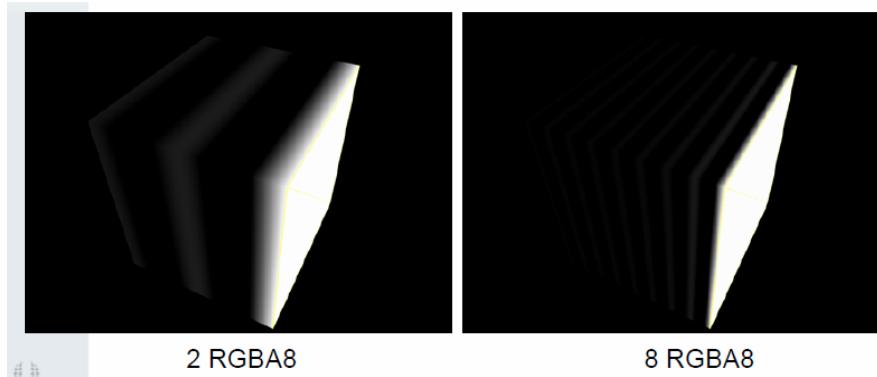
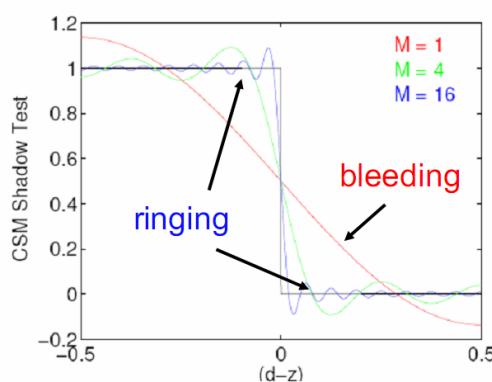
CSM. Рендеринг

- берем $\cos(c_k z)$ и $\sin(c_k z)$ из CSM текстур
- финальная освещенность
 - умножаем на 2 чтобы получить 1 при $d==z$

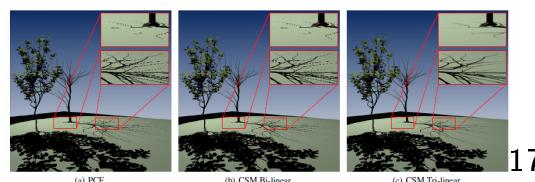
$$f(d, z) \approx \frac{1}{2} + 2 \sum_{k=1}^M \frac{1}{c_k} \cos(c_k d) \sin(c_k z) - 2 \sum_{k=1}^M \frac{1}{c_k} \sin(c_k d) \cos(c_k z)$$



CSM. Колца (Ringing)



CSM. Результаты

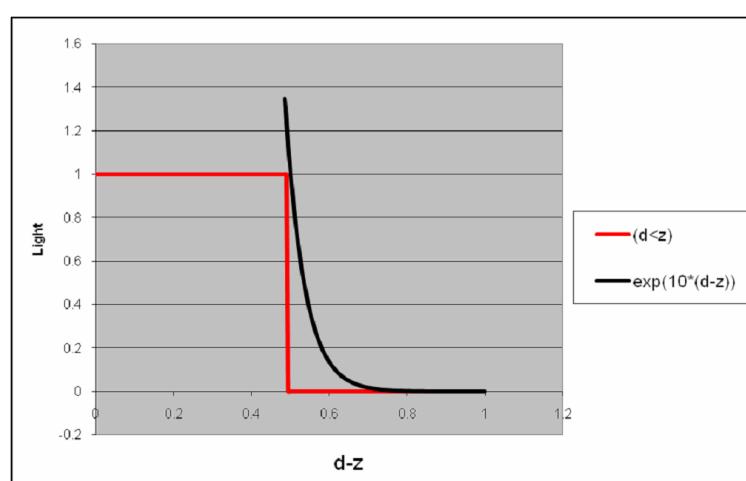


17

¹⁷T. Annen, T. Mertens, P. Bekaert, H.-P. Seidel, J. Kautz, "Convolution Shadow Maps", EGSR, June 2007

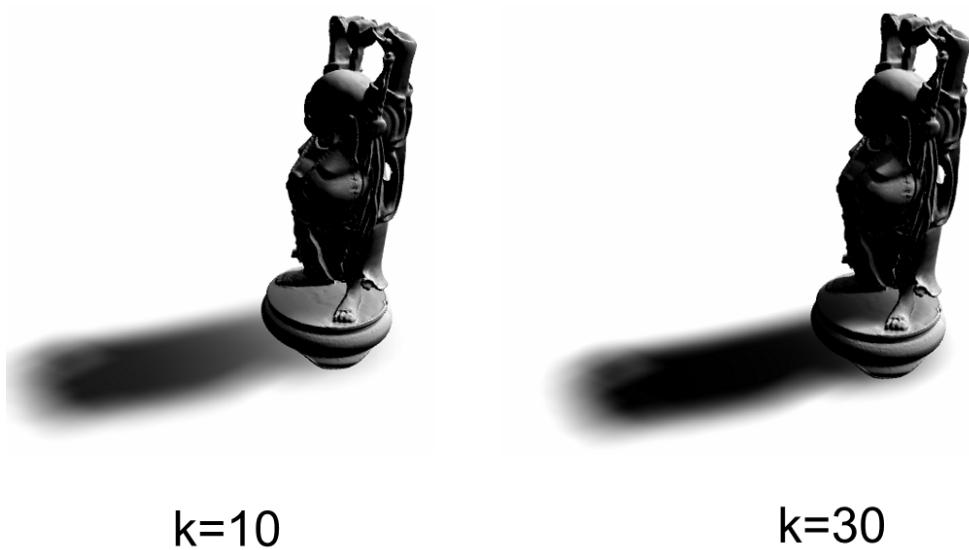
Exponential Shadow Maps (ESM)

- ESM аппроксимируют $f(d, z) = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} e^{-\alpha(d-z)}$ ¹⁸
- $f(d, z) = e^{-c(d-z)} = e^{-cd} e^{cz}$



¹⁸Marco Salvi, "Rendering Filtered Shadows with Exponential Shadow Maps", ShaderX6

ESM. Тюнинг



k=10

k=30

VSM/CSM/ESM. Сравнение



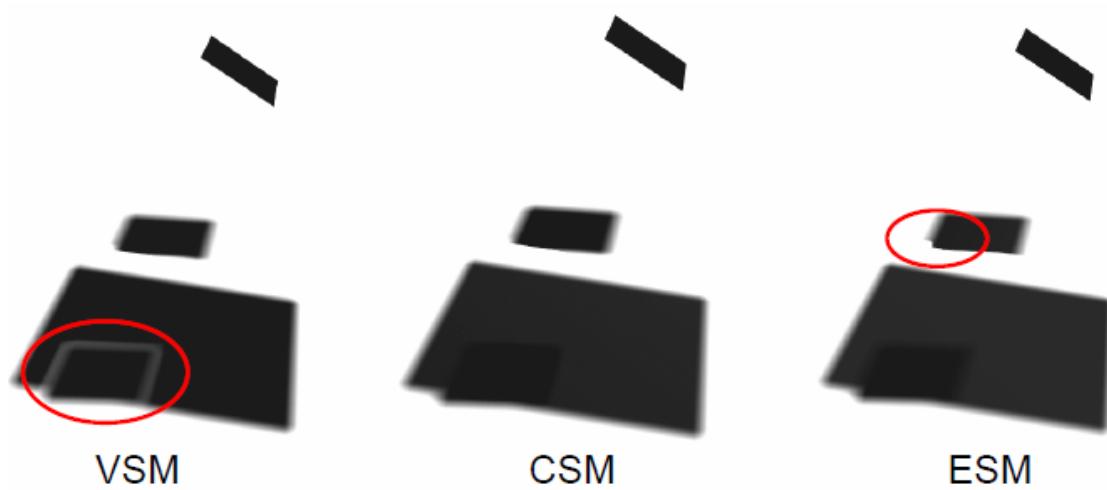
VSM – 87 fps

CSM – 38 fps

ESM – 93 fps

VSM	CSM	ESM
R32G32	N * (R8G8B8A8)	R32

VSM/CSM/ESM. Сравнение



Общая классификация. Четкие тени

- первое поколение
 - lightmaps
 - геометрические
 - projected geometry, shadow volumes
 - maps
 - shadow maps, shadow buffers(+ objectIDs)
- второе поколение
 - эффективное использование shadow map'а
 - perspective shadow maps, trapezoidal shadow maps, light space perspective shadow maps
 - разделение фрагмента
 - cascaded shadow maps (parallel split shadow maps)

Общая классификация. Мягкие тени

- пенумбра фиксированного размера
 - percentage close-filtering
 - variance shadow maps
 - convolution shadow maps
 - exponential shadow maps
- пенумбра переменного размера
 - percentage closer soft shadows
 - PCSS + VSM/CSM/ESM
 - summed area table (SAT)
 - mipmapping