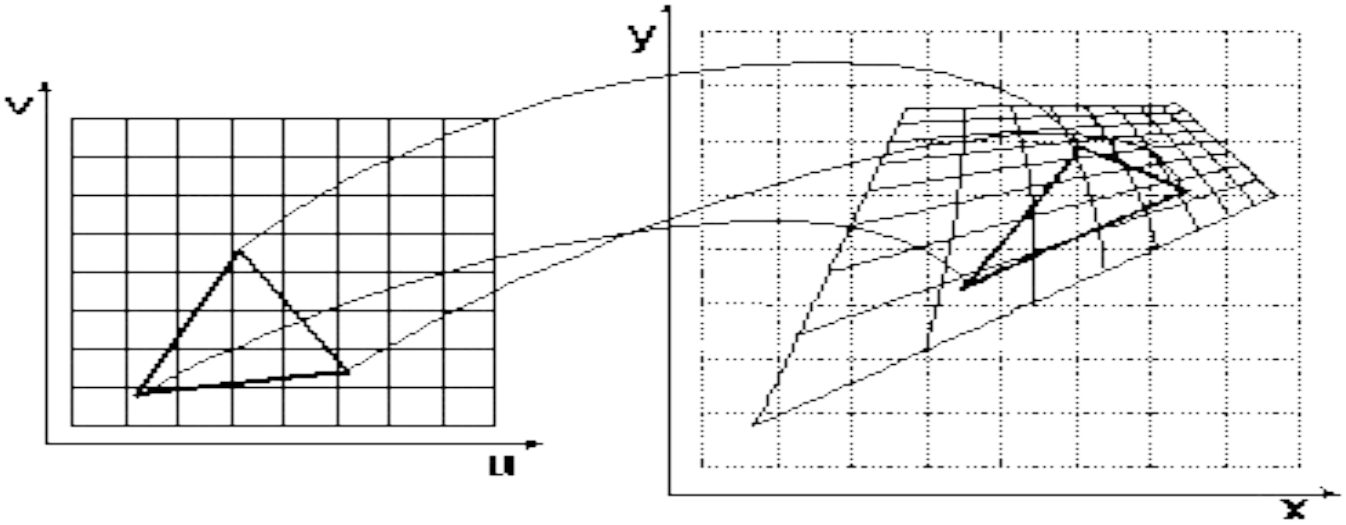
Методы текстурирования и антиалиасинг

Методы текстурирования (MIP-mapping, bump-mapping), фильтрации, сглаживания

Текстурирование. Наложение текстуры или текстурирование (texture mapping) - это метод, посредством которого на поверхность объекта накладывается некоторое изображение, называемое изображением текстуры.
В общем контексте графического конвейера этот метод открывает огромные возможности, но простота идеи метода наложения текстуры весьма обманчива.

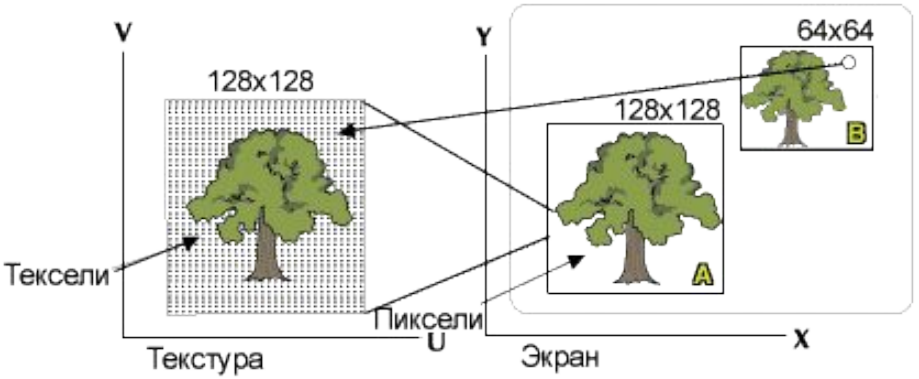
Технология текстурирования заключается в проецировании изображения (текстуры) на трехмерную поверхность. Таким образом обеспечивается дополнительная **детализация 3D объекта без усложнения его геометрии.**



Когда изображение используется в качестве текстуры, накладываемой на 3D примитив, проявляется множество разнообразных ошибок визуализации, называемых артефактами.

Текстурирование. Сэмплинг и его артефакты

Сэмплинг (point-sampling) – простейший метод текстурирования, в котором текселы непосредственно переносятся в пикселы изображения с учетом масштаба. Методу присущ серьезный артефакт: когда наблюдатель приближается вплотную к текстурированной поверхности, происходит пикселизация. Для избежания этого артефакта используют методы текстурирования, основанные на фильтрации текстур.

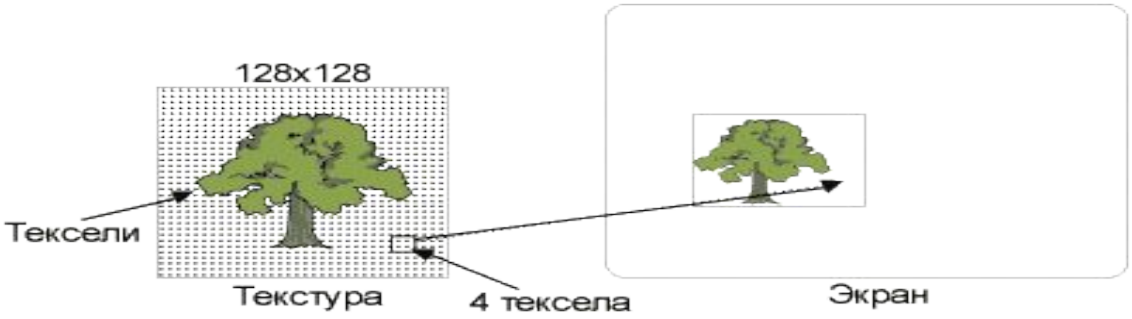


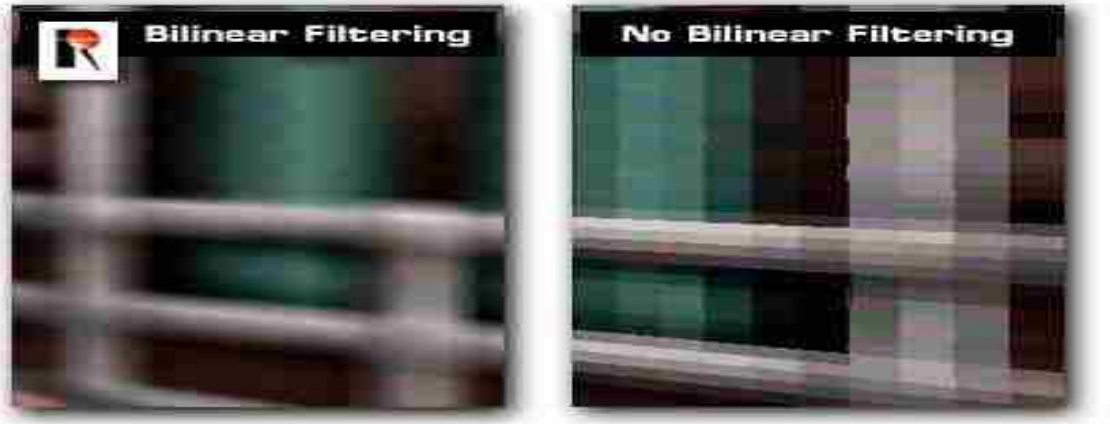
A: однозначное соответствие между текселами и пикселами
B: pixel 0:texel 0; pixel 1:texel 2; pixel 2:texel 4...

Артефакты и билинейная фильтрация

Bi-linear filtering - это техника устранения искажений изображения (фильтрация), таких, как "блочность" текстур при их увеличении. При медленном вращении или приближении/ удалении объекта могут быть заметны "перескакивания" пикселов с одного места на другое, т.е. появляется блочность.

Во избежании этого эффекта применяют билинейную фильтрацию, при использовании которой в качестве цвета каждого пиксела берется взвешенное среднее значение (линейная интерполяция) цвета четырех смежных текселов (верхний рис.). Результирующий цвет пиксела определяется в результате трех операций смешивания: сначала смешиваются цвета двух пар текселов по x, а потом смешиваются два полученных цвета по y. Результат показан на нижнем рис.



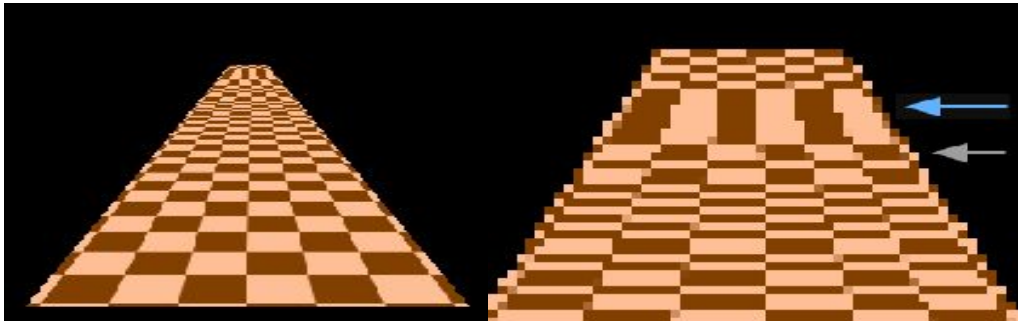


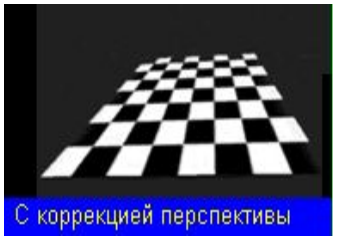
Артефакты depth aliasing и перспективная коррекция

Существует класс артефактов наложения текстур известный под названием "**depth aliasing**" (ошибки глубины сцены или Z-aliasing), от которых билинейная фильтрация не избавляет и не может избавить.

Ошибки "depth aliasing" возникают из-за того, что объекты более отдаленные от наблюдателя, выглядят более маленькими на экране. Если объект двигается и удаляется, то наложенное текстурное изображение становится все более и более сжатым. В конечном счете появляются ошибки визуализации. Эти ошибки визуализации **особенно нежелательны в анимации,** где такие артефакты становятся причиной мерцания и эффекта медленного движения в той части изображения, которая должна быть неподвижной. Как только вертикальная сторона квадрата (высота) сокращается до двух пикселей (см. напротив голубой стрелки), появляются артефакты "depth-aliasing" - несколько квадратов сливаются в один.

Одним из способов устранения depth aliasing, имеющим и самостоятельное значение, является **перспективная коррекция**. Перспективная коррекция – ресурсоемкая процедура (одна операция деления на каждый пиксел), поэтому 3D-ускорители реализуют ее аппаратно. Но разные ускорители достигают разного качества перспективной коррекции.



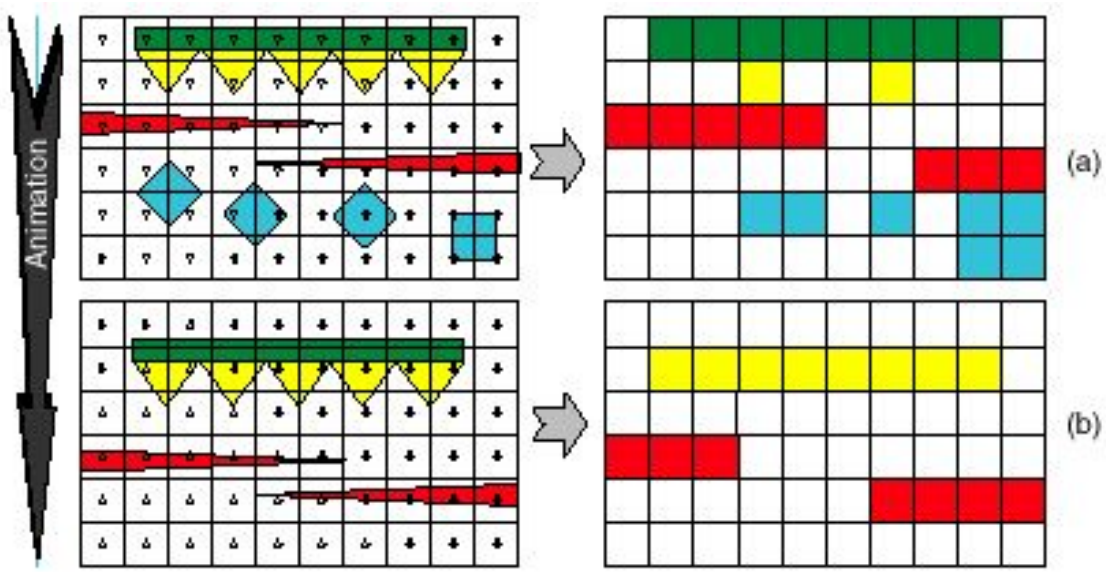


Алгоритм

Артефакты. Влияние анимации

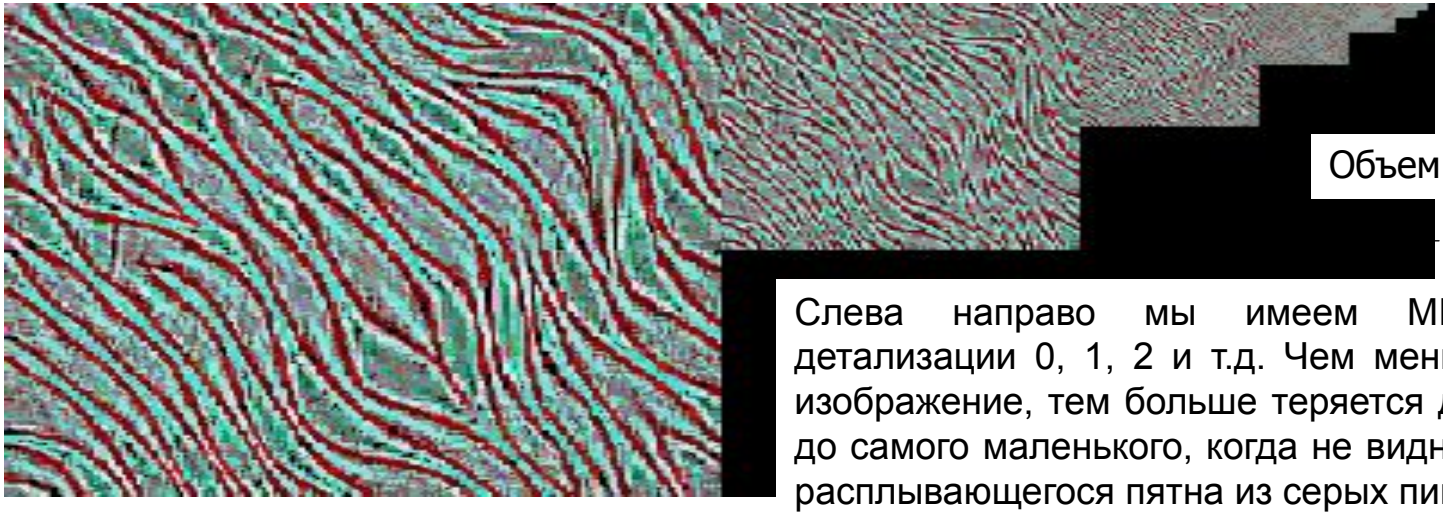
Иллюстрация исчезновения полигонов

- (а) хорошо детализированное изображение слева,
- (б) грубая версия с отсутствующими полигонами и деталями справа



Depth aliasing и MIP-mapping

Для избежания ошибок "depth aliasing" и имитации того факта, что объекты на расстоянии выглядят менее детализированными, чем те, что находятся ближе к точке наблюдения, используется техника, известная как ***MIP-mapping***. Mip-mapping - наложение текстур, имеющих разную степень или уровень детализации, когда в зависимости от расстояния до точки наблюдения выбирается текстура с необходимой детализацией. Mip-текстура (mip-map) состоит из набора заранее отфильтрованных и масштабированных изображений. В изображении, связанном с уровнем mip-map, пиксель представляется в виде среднего четырех пикселей из предыдущего уровня с более высоким разрешением. Отсюда, изображение связанное с каждым уровнем mip-текстуры в четыре раза меньше по размеру предыдущего mip-map уровня.



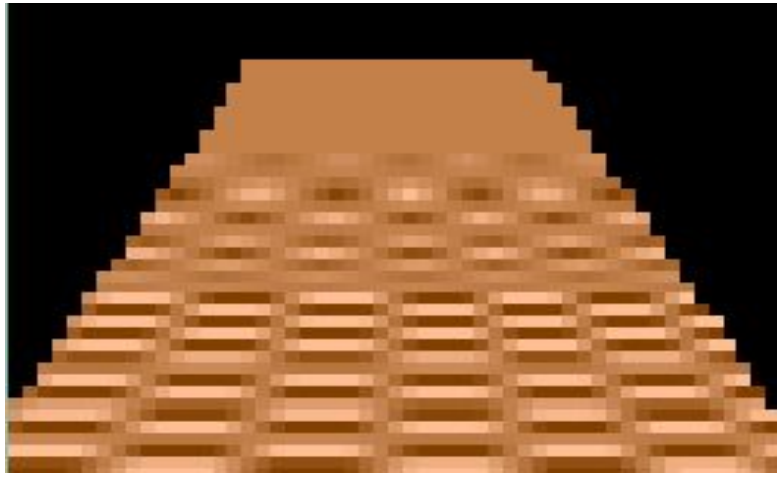
Объем MIP-текстуры:

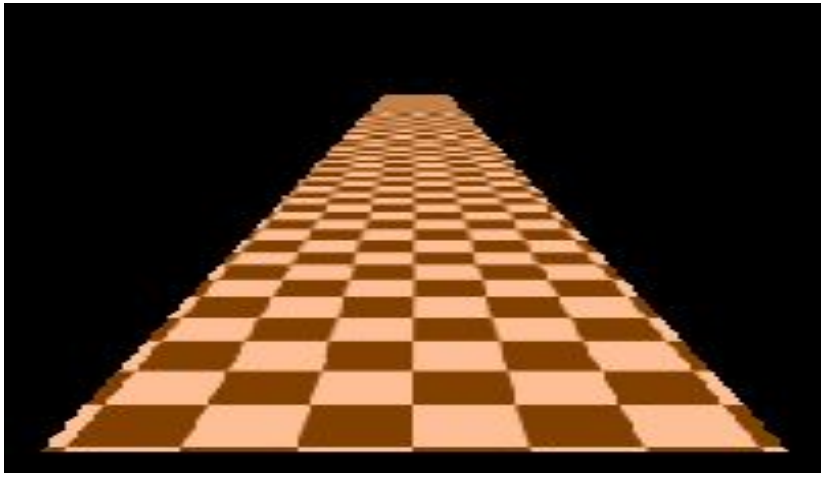
$$\ldots + \frac{1}{4^3} + \ldots \leq \frac{1}{1-1/4} = \frac{4}{3}$$

Слева направо мы имеем MIP-map уровни детализации 0, 1, 2 и т.д. Чем меньше становится изображение, тем больше теряется деталей, вплоть до самого маленького, когда не видно ничего, кроме расплывающегося пятна из серых пикселей.

MIP-mapping и уровни детализации (LOD)

Степень или уровень детализации - Level of Detail или просто LOD, используются для определения, какой mip-map уровень (или какую степень детализации) следует выбрать для наложения текстуры на объект.



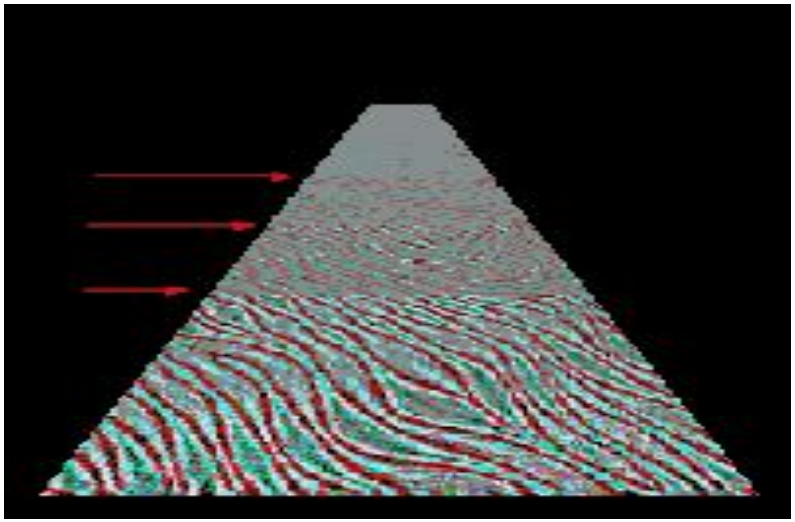


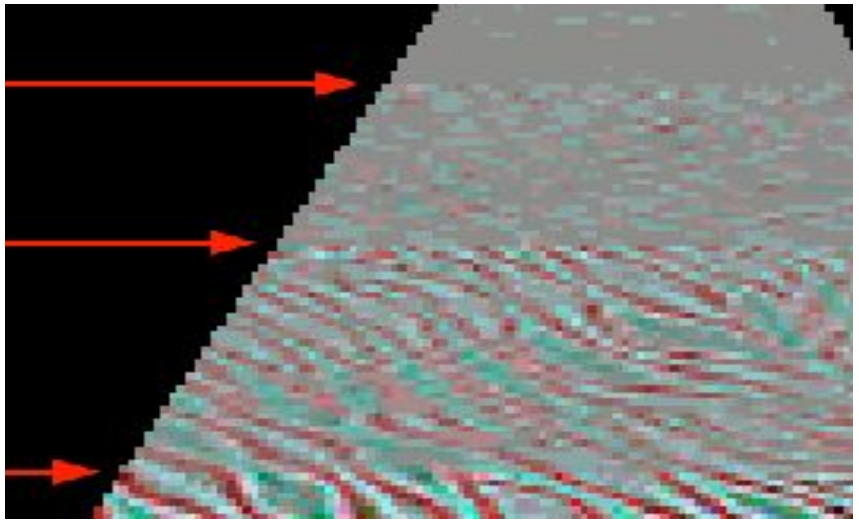
Per-polygon mip-mapping (mip-текстурирование по каждому полигону). LOD вычисляется лишь раз для всего треугольника, следствием использования этого значения для всех пикселов треугольника становится эффект растрескивания (на рис. слева), когда некоторые треугольники, из которых состоит анимированный объект, вдруг внезапно становятся чрезмерно размытыми или с неровностями.

Per-pixel mip-mapping (попиксельное mip-текстурирование). Значение LOD вычисляется для каждого пиксела. В результате предотвращается появление ошибок визуализации и излишней размытости (на рис. справа).

MIP-текстурирование и mip-banding (полосатость)

В то время как mip-текстурирование решает проблему ошибок "depth-aliasing", его использование может стать причиной появления других артефактов. При удалении объекта от точки наблюдения, происходит переход от низкого mip-map уровня (соответствующего изображению с высокой детализацией) к высокому mip-map уровню (соответствующего изображению с высокой степенью фильтрации и низкой детализацией). В момент нахождения объекта в переходном состоянии от одного mip-map уровня к другому, появляется особый тип ошибок визуализации, известных под названием "mip-banding" (мип-бендинг) – полосатость или слоеность, т.е. явно различимые границы перехода от одного mip-map уровня к другому.





MIP-текстурирование. Расчет LOD и фильтрация

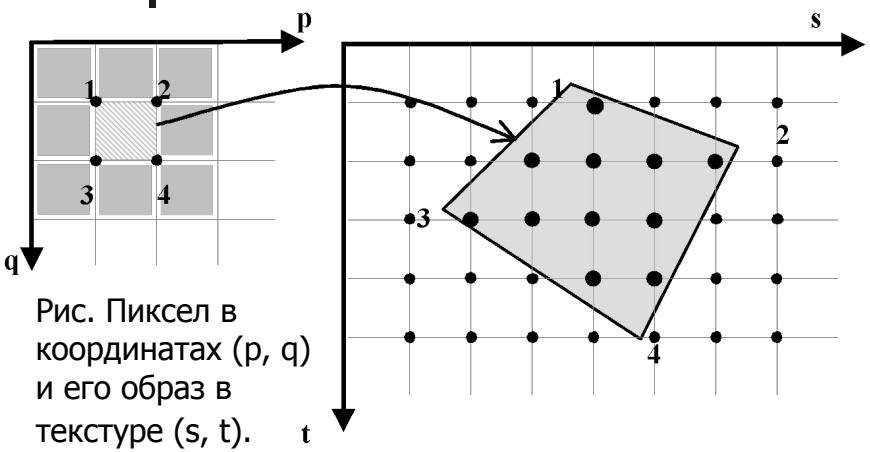


Рис. Пиксел в координатах (p, q) и его образ в текстуре (s, t).

При наложении текстуры методом mipmapping'а первая задача – определить подходящий уровень детализации LOD, чтобы размер образа экранного пиксела на текстуре и размер тексела текстуры были максимально близки.

Рассмотрим пиксел как квадрат со стороной=1. Его образ в координатах (s, t) произвольный четырех-угольник. Изменение s вдоль образа горизонтальной стороны пиксела определяется величиной ∂s/∂p рассчитанной в центре пиксела.

Изменение t вдоль образа горизонтальной стороны пиксела аналогично приблизительно равно ∂t/∂p.

Заменив p на q получим соотношения для вертикальной стороны пиксела (∂s/∂q, ∂t/∂q).

Производные обычно приближаются конечными разностями значений на сторонах пикселов.

В результате – варианты оценки размера пиксела (для комбинирования):

- $BLUR: LOD = MAX\left(\sqrt{\frac{\partial s}{\partial p}^2 + \frac{\partial t}{\partial p}^2}, \sqrt{\frac{\partial s}{\partial q}^2 + \frac{\partial t}{\partial q}^2}\right)$ слегка размытое изображение;
- $SHARP: LOD = MIN\left(\sqrt{\frac{\partial s}{\partial p}^2 + \frac{\partial t}{\partial p}^2}, \sqrt{\frac{\partial s}{\partial q}^2 + \frac{\partial t}{\partial q}^2}\right)$ изображение резкое, контрастное и

MIP-текстурирование. Расчет LOD и фильтрация

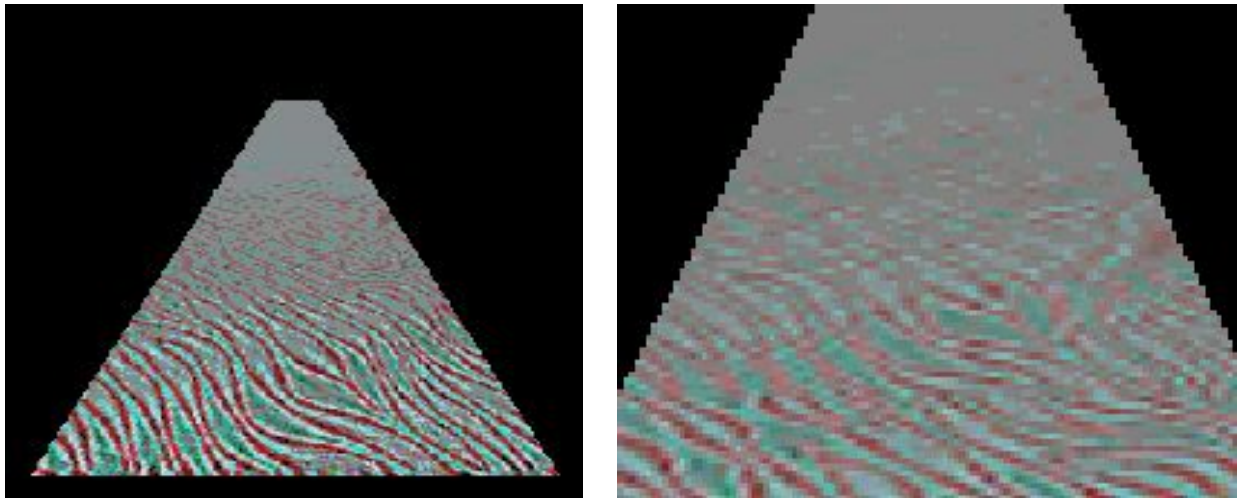
$$LOCHEED\ :LOD = MAX\left(\sqrt{\frac{\partial s}{\partial p}^2 + \frac{\partial s}{\partial q}^2}, \sqrt{\frac{\partial t}{\partial p}^2 + \frac{\partial t}{\partial q}^2}\right)$$

Получившиеся значения LOD и координат (s, t) вещественны. Существует три метода выбора цвета пиксела, основанные на данных оценках LOD:
1. Nearest (см. рис.): округляем LOD до ближайшего уровня, а (s, t) до ближайшего тексела
2.Linear: уровни детализации [LOD] и [LOD+1], на каждом берем цвет точки (s, t) округляя до ближайшего тексела, цвет пиксела определяем линейной интерполяцией цветов [LOD] и [LOD+1] по вещественному значению уровня LOD.
3.Trilinear: аналогичен Linear, но значения цвета на обоих уровнях, рассчитываются по методу Bilinear.

Метод Trilinear позволяет полностью исключить артефакты межуровнего перехода при MIP-mapping-е. Необходимый объем вычислений пока не позволяет реализовать его в реальном времени на слабых ускорителях:

MIP-banding и трилинейная фильтрация

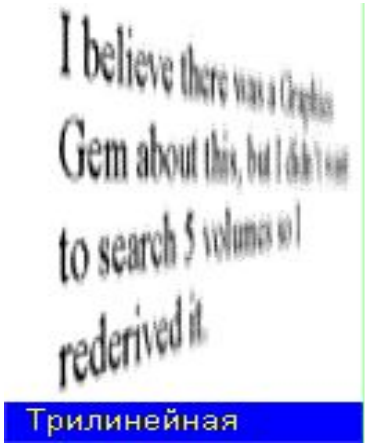
Трилинейная фильтрация (tri-linear filtering) представляет собой технику, которая удаляет артефакты "mip-banding", возникающие при использовании mip-текстурирования. При трилинейной фильтрации берется блок из четырех текселей и находится среднее (интерполированное) значение цвета, как при билинейной, затем берется такой же четырехтексельный блок из соседнего mip-map уровня и так же усредняется. И после всего этого находится среднее значение между двумя полученными, которое и будет цветом обрабатываемого пикселя. Эффективно удаляются линии, которые возникают на стыках mip-map уровней при билинейной фильтрации (см. рис). Трилинейная фильтрация требует дополнительных ресурсов, т.к. реализуется одновременной обработкой двух уровней текстур.



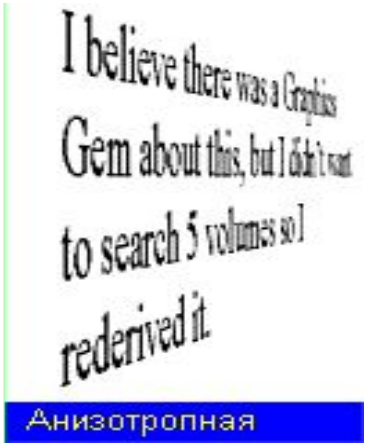
Анизотропная фильтрация (Anisotropic filtering)

Так как билинейная и трилинейная фильтрации являются изотропными - изображение фильтруется в определенной форме - в форме квадрата. Большинство же формируемых объектов из-за проекционных искажений не подходят под эту форму: для их качественной обработки необходимо использовать другой тип фильтрации - **анизотропный**. Анизотропная фильтрация обычно оперирует не менее чем 8 текселями, во все стороны mip-map уровней, при этом используется модель неопределенной заранее формы. В результате убираются шумы и искажения объектов, а изображение в целом получается более качественным. Анизотропная фильтрация работает с текселами как с эллипсами и для получения одного пиксела обрабатывает до 32 (2x16) текселов.

Качество текстуры при анизотропной фильтрации даже на дальних дистанциях остается схожей с оригинальным; при изотропной фильтрации же видна тенденция в "сглаживанию" изображения, в результате теряется качество. Анизотропная фильтрация, как и трилинейная, уменьшает неровность текстур. Но при использовании анизотропной фильтрации качество получается лучшим,.



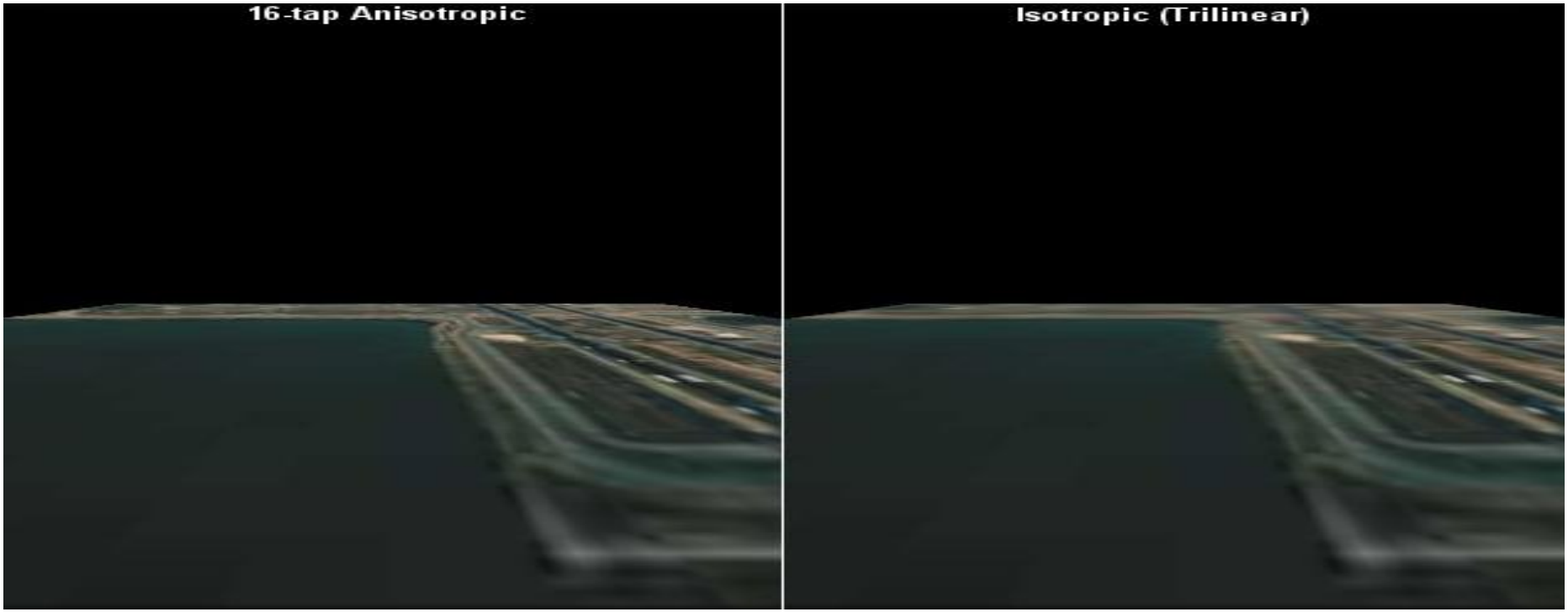
Трилинейная



Анизотропная

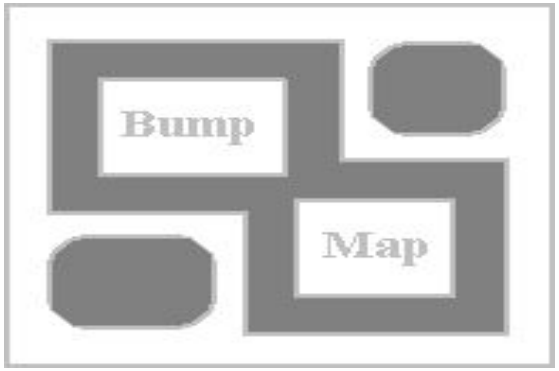
Анизотропная фильтрация. Пример

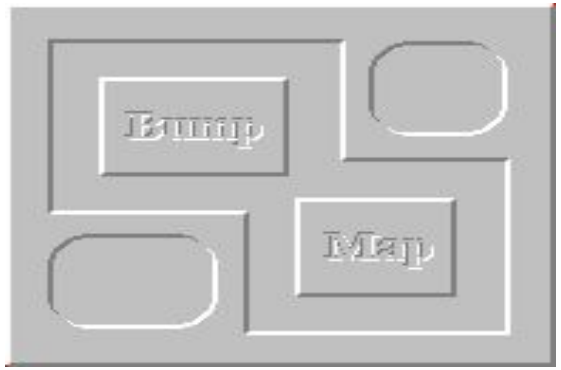
Сравните две картинки: на одной использовалась анизотропная фильтрация 16-текселей, с помощью которой исчезли искажения между mip-map уровнями и шум изображения, на второй картинке анизотропная фильтрация выключена.



Наложение рельефа (bump-mapping)

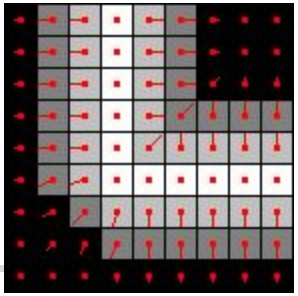
Для того чтобы подчеркнуть бугорки и впадины рельефа с помощью светотени, надо затемнить либо осветлить стенки этих бугорков и впадин. Другой метод состоит в симуляции рельефности, глянцевой или зеркальной поверхности, отражением окружающей среды. Это и делает техника наложения рельефа. Рельефное текстурирование напоминает обычный процесс наложения текстуры на полигон, но текстуры (на рис. слева), предназначенной для придания плоскому полигону зрительного ощущения рельефа и объемности. Эта техника может добавить детализацию сцене без создания дополнительных полигонов. Сам полигон остается плоским.





Для реализации рельефного текстурирования в настоящий момент существует два подхода. Первый -- реализация эффекта **выдавливания** (**embossed effect**) в процессе bump mapping, и второй – использование карт окружающей среды (**environment-map bump mapping**).

Техника выдавливания (embossing)



Красные векторы указывают на уменьшение высоты.

Техника выдавливания (embossing) использует карту высот для затенения и осветления определенных участков поверхности так, чтобы создавалось впечатление, что выпуклости отбрасывают тени. Метод реализован в современных 3D акселераторах.

Способ преобразования информации о высоте неровностей на карте высот в информацию о величине подстройки вектора нормали

1.Для каждого пиксела по высотам карты (bump map) рассчитывается вектор, указывающий направление уклона поверхности, т.е. вектор градиента:

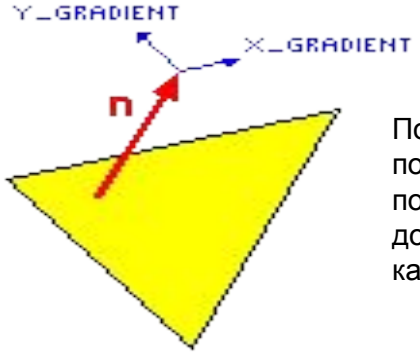
x_gradient = pixel(x-1, y) - pixel(x+1, y), y_gradient = pixel(x, y-1) - pixel(x, y+1),

где x и y -- координаты соответствующего пиксела

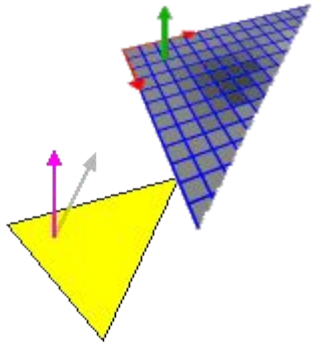
2.Вектор нормали к поверхности корректируется для каждого пиксела на величину градиента

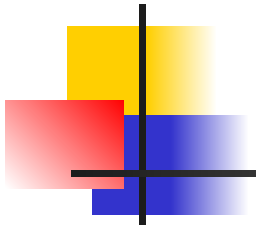
New_Normal = Normal + (U * x_gradient) + (V * y_gradient)

Получив новый вектор нормали, мы можете просчитать яркость данного пикселя.



Полигон с изначальным вектором нормали, обозначенным **n**. Также показаны два вектора, которые будут использованы для изменения положения (направления) нормали к пикселю под ним. Оба вектора должны располагаться параллельно осям координат применяемой карты высот.





Environment-Map Bump Mapping

Еще один способ реализации рельефного текстурирования - это техника текстурирования с использованием текстуры (карты) окружающей среды 3D сцены (Environment-Map Bump Mapping). Однако данный метод может быть реализован только при использовании акселераторов, которые поддерживают его аппаратно.

В данном случае bump mapping будет использовать две текстуры (не считая базовой текстуры объекта).

Первая текстура - текстура с информацией об уклонах (ее еще можно назвать картой изменений высот; при выдавливании применялась просто карта высот). Эта текстура вырабатывается на основе карты высот путем анализа прилежащих друг к другу текселов. Акселератор использует эту информацию для изменения координат тексела в соответствии с информацией, поставляемой второй текстурой.

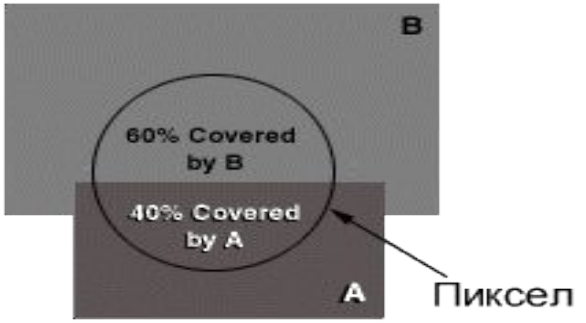
Вторая текстура -- это карта окружающей среды, которая накладывается на исходный полигон, но уже с ST координатами, измененными процедурой отражения среды. Если изготовить environment map в виде яркостной карты, расположив источники света градиентно и по кругу (что-то похожее на эффект, проявляющийся при использовании инструмента "баллончик с краской" из графических программ), то мы получим результат похожий на выдавливание, но теперь мы не ограничены в количестве применяемых источников света, плюс наше освещение не обязательно должно быть монохромным.

Сглаживание (anti-aliasing). Краевой антиалиасинг

Алиасинг – результат сэмплинга, то есть преобразования непрерывного изображения в дискретное. Алиасинг ухудшает качество изображения, вызывая разнообразные артефакты: такие, как лестничный эффект. Процедура *сглаживания* может помочь улучшить (или, как минимум, не ухудшить) качество графического изображения. В некоторых программах автоматическое применение сглаживания даже является одной из опций функции масштабирования. По предназначению антиалиасинг делится на краевой и полный.

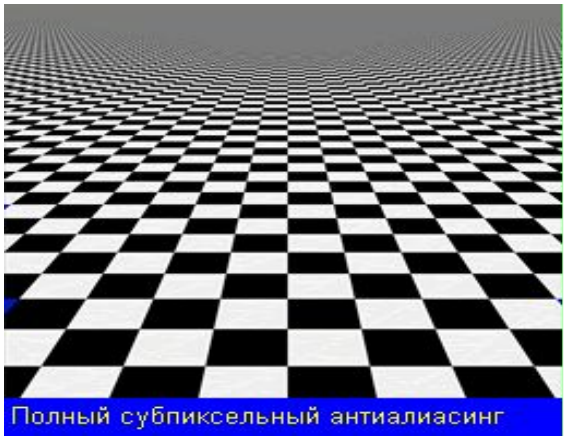
Краевой антиалиасинг (КАА) – механизм борьбы с лестничным эффектом. КАА сглаживает края полигонов и диагональные линии. Для реализации краевого антиалиасинга чаще всего используют технику усреднения по площади (area averaging).

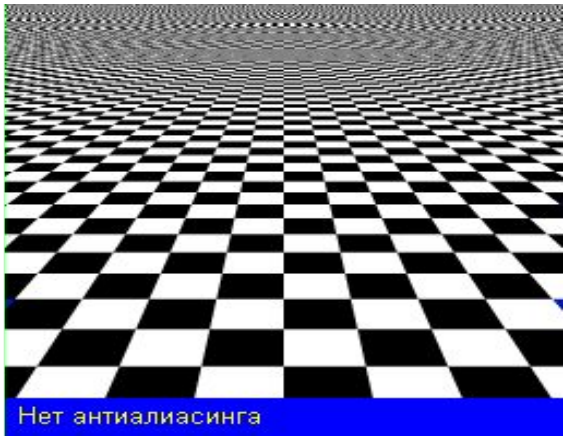
Цвет пиксела определяется на основании того, насколько каждый полигон перекрывает данный пиксел (см. рис).

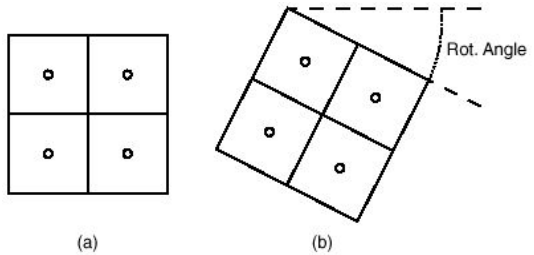


Anti-aliasing. Полный антиалиасинг

Полный антиалиасинг, в отличие от краевого, направлен на полную нейтрализацию алиасинга, в том числе bleeding-а (просачивания цветов фона). Представителем полного антиалиасинга является **субпиксельный антиалиасинг**, который реализован в 3D-ускорителях.
Субпиксельный антиалиасинг базируется на технике **суперсэмплинга**. Суперсэмплинг означает, что вся сцена рендерится в каком-то большом виртуальном разрешении, а затем сжимается до фактического разрешения. В общем случае виртуальное и фактическое разрешения могут быть некратными. Техника суперсэмплинга эффективно реализуется благодаря тому, что ускорители используют tile-based архитектуру. Ускорителю традиционной архитектуры потребовался бы большой объем памяти (для виртуального разрешения 1600x1200 – более 8 MB). Ускоритель tile-based архитектуры работает не с целым фреймбуфером, а с отдельными фрагментами (tile - плитка или фрагмент изображения, тайл может быть и размером 32 на 32 пикселя). И все данные о субпикселах он хранит только для фрагмента, который рендерится в данный момент.

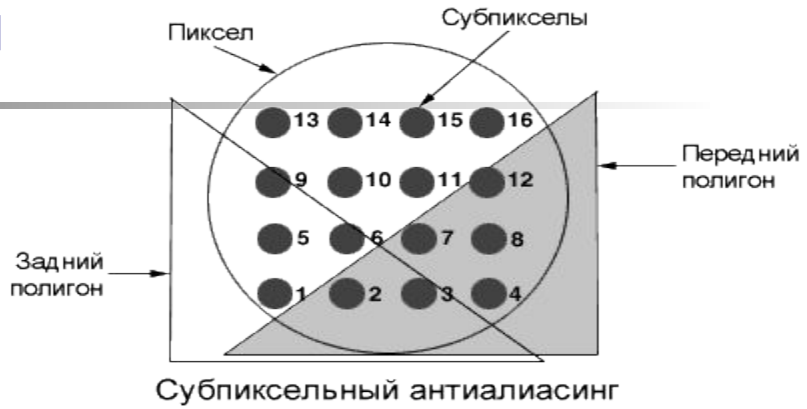






a)Упорядоченная решетка (Ordered Grid Super-sampling, OGSS); b) Повернутая или флуктуирующая (Rotated Grid Super-sampling, RGSS)

Полный антиалиасинг. Мультисэмплинг и маски



Субпиксельный антиалиасинг

В некоторых 3D-ускорителях используется другой метод, основанный на хранении **маски**. Рассмотрим случай, когда 1 пиксел разбивается на 16 (4x4) субпикселов (эта техника называется **мультисэмплингом**), а полигоны рендерятся front-to-back.

Когда рендерится полигон не переднем плане, субпикселы 2,3,4,7,8,12 окрашиваются в цвет переднего полигона и запоминаются как маска. Когда рендерится задний полигон, в его цвет окрашиваются субпикселы 1,5,6,9. Субпикселы 2,3, маскируются и остаются с цветом переднего полигона. В результате – никакого **bleeding**-а.

Недостаток такого антиалиасинга – это необходимость хранения маски для каждого пиксела и требование сортировки полигонов front-to-back. Второе требование можно обойти, сохраняя z-координату для каждого субпиксела. Хранить z-координаты для всех субпикселей на экране невозможно, так как это требует гигантского объема видеопамяти. Поддержку субпиксельного антиалиасинга с z-буферизацией реализует техника **аккумулятора**. В памяти аккумулятора последовательно проходят обработку субпиксельные фрагменты. Как следствие, - уменьшение производительности в число раз, равное числу субпикселов в пикселе. Например субпиксельный антиалиасинг 4x4 снижает производительность в 16 раз.