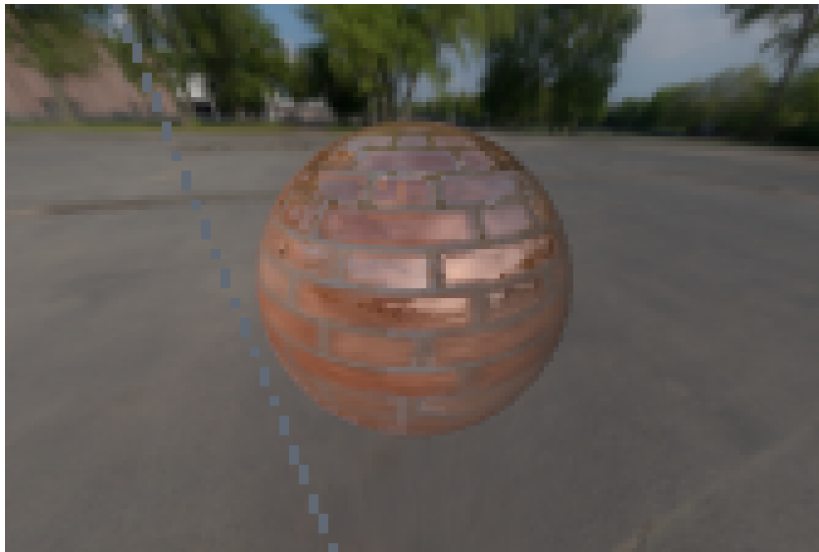


Компьютерная графика

Лекция 11: HDR, tone mapping, gamma correction, sRGB,
color banding, dithering

2021

Артефакт из 10ой практики



Артефакт из 10ой практики

- ▶ Возникает при зацикливании текстурных координат при расчёте mipmap-уровня

Артефакт из 10ой практики

- ▶ Возникает при зацикливании текстурных координат при расчёте мipmap-уровня
- ▶ Мipmap-уровень, который будет взят для текстуры, вычисляется в группах 2×2 пикселей на основе разности текстурных координат в соседних пикселях

Артефакт из 10ой практики

- ▶ Возникает при зацикливании текстурных координат при расчёте миптар-уровня
- ▶ Миптар-уровень, который будет взят для текстуры, вычисляется в группах 2×2 пикселей на основе разности текстурных координат в соседних пикселях
- ▶ В одном пикселе группы вычисляется текстурная координата, близкая к 0, а в соседнем – близкая к 1

Артефакт из 10ой практики

- ▶ Возникает при зацикливании текстурных координат при расчёте мipmap-уровня
- ▶ Мipmap-уровень, который будет взят для текстуры, вычисляется в группах 2×2 пикселей на основе разности текстурных координат в соседних пикселях
- ▶ В одном пикселе группы вычисляется текстурная координата, близкая к 0, а в соседнем – близкая к 1
- ▶ \Rightarrow Выбирается слишком большой мipmap-уровень (в данном случае он выглядит просто серым)

Артефакт из 10ой практики

- ▶ Может возникнуть в любой ситуации, когда текстура накладывается цилиндрически

Артефакт из 10ой практики

- ▶ Может возникнуть в любой ситуации, когда текстура накладывается цилиндрически
- ▶ Как решать:

Артефакт из 10ой практики

- ▶ Может возникнуть в любой ситуации, когда текстура накладывается цилиндрически
- ▶ Как решать:
 - ▶ Первый способ: разрезать в этом месте геометрию (например, для цилиндра дублировать вершины 'нулевого меридиана', у одной копии текстурная координата равна 0, у другой – 1)
 - ▶ Второй способ: хитрее вычислять текстурные координаты и выбирать вариант с меньшим расхождением в соседних пикселях

Артефакт из 10ой практики

- ▶ Может возникнуть в любой ситуации, когда текстура накладывается цилиндрически
- ▶ Как решать:
 - ▶ Первый способ: разрезать в этом месте геометрию (например, для цилиндра дублировать вершины 'нулевого меридиана', у одной копии текстурная координата равна 0, у другой – 1)
 - ▶ Второй способ: хитрее вычислять текстурные координаты и выбирать вариант с меньшим расхождением в соседних пикселях
- ▶ [Distinctive Derivative Differences](#) – подробная статья про проблему и решения

HDR

- ▶ Проблема: после вычисления освещённости мы можем получить значения компонент цвета большие 1, и они будут обрезаны до 1

HDR

- ▶ Проблема: после вычисления освещённости мы можем получить значения компонент цвета большие 1, и они будут обрезаны до 1
- ▶ В реальном мире интенсивность света (например, между солнечным днём и тёмной ночью) может меняться на 15 порядков

HDR

- ▶ Проблема: после вычисления освещённости мы можем получить значения компонент цвета большие 1, и они будут обрезаны до 1
- ▶ В реальном мире интенсивность света (например, между солнечным днём и тёмной ночью) может меняться на 15 порядков
- ▶ При рендеринге объект может освещаться тусклым ambient освещением, а может сразу десятком ярких источников света

HDR

- ▶ Проблема: после вычисления освещённости мы можем получить значения компонент цвета большие 1, и они будут обрезаны до 1
- ▶ В реальном мире интенсивность света (например, между солнечным днём и тёмной ночью) может меняться на 15 порядков
- ▶ При рендеринге объект может освещаться тусклым ambient освещением, а может сразу десятком ярких источников света
- ▶ High Dynamic Range (HDR) – термин, означающий большой (не ограниченный $[0, 1]$) диапазон интенсивностей

HDR

- ▶ Проблема: после вычисления освещённости мы можем получить значения компонент цвета большие 1, и они будут обрезаны до 1
- ▶ В реальном мире интенсивность света (например, между солнечным днём и тёмной ночью) может меняться на 15 порядков
- ▶ При рендеринге объект может освещаться тусклым ambient освещением, а может сразу десятком ярких источников света
- ▶ High Dynamic Range (HDR) – термин, означающий большой (не ограниченный $[0, 1]$) диапазон интенсивностей
- ▶ HDR текстура (например, environment map) – содержит значения, выходящие за диапазон $[0, 1]$ (обычно 32-bit floating-point)

HDR

- ▶ Проблема: после вычисления освещённости мы можем получить значения компонент цвета большие 1, и они будут обрезаны до 1
- ▶ В реальном мире интенсивность света (например, между солнечным днём и тёмной ночью) может меняться на 15 порядков
- ▶ При рендеринге объект может освещаться тусклым ambient освещением, а может сразу десятком ярких источников света
- ▶ High Dynamic Range (HDR) – термин, означающий большой (не ограниченный $[0, 1]$) диапазон интенсивностей
- ▶ HDR текстура (например, environment map) – содержит значения, выходящие за диапазон $[0, 1]$ (обычно 32-bit floating-point)
- ▶ HDR рендеринг – позволяет отобразить HDR-освещение

Tone mapping

- ▶ Нужно превратить диапазон освещённостей $[0, \infty)$ в диапазон $[0, 1]$

Tone mapping

- ▶ Нужно превратить диапазон освещённостей $[0, \infty)$ в диапазон $[0, 1]$
- ▶ В принципе, подойдёт любая монотонно возрастающая функция $[0, \infty) \rightarrow [0, 1]$
 - ▶ $x \mapsto \frac{x}{1+x}$ – Reinhard operator
 - ▶ $x \mapsto \arctan(x)$
 - ▶ $x \mapsto \frac{2}{1+e^{-x}} - 1$

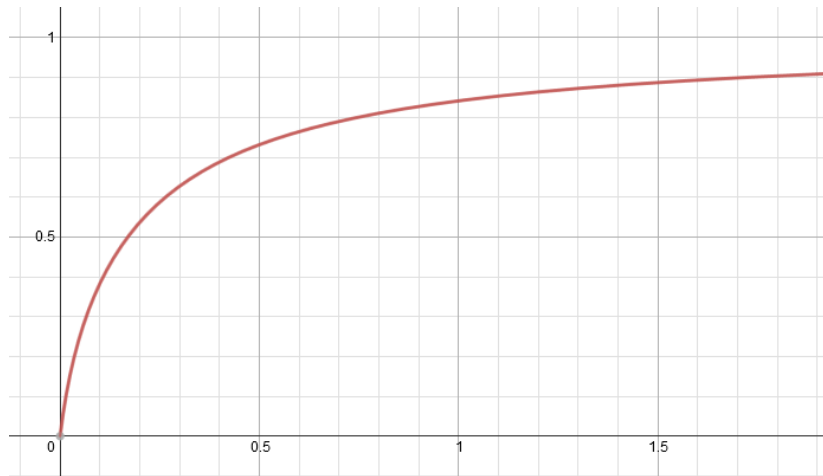
Tone mapping

- ▶ Нужно превратить диапазон освещённостей $[0, \infty)$ в диапазон $[0, 1]$
- ▶ В принципе, подойдёт любая монотонно возрастающая функция $[0, \infty) \rightarrow [0, 1]$
 - ▶ $x \mapsto \frac{x}{1+x}$ – Reinhard operator
 - ▶ $x \mapsto \arctan(x)$
 - ▶ $x \mapsto \frac{2}{1+e^{-x}} - 1$
- ▶ Иногда используют более сложные функции, взятые из кинематографа (filmic tone mapping)

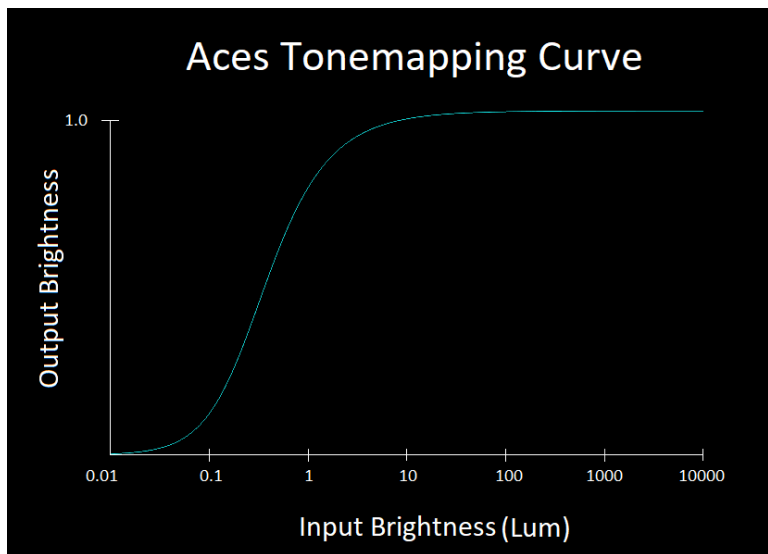
Tone mapping

- ▶ Нужно превратить диапазон освещённостей $[0, \infty)$ в диапазон $[0, 1]$
- ▶ В принципе, подойдёт любая монотонно возрастающая функция $[0, \infty) \rightarrow [0, 1]$
 - ▶ $x \mapsto \frac{x}{1+x}$ – Reinhard operator
 - ▶ $x \mapsto \arctan(x)$
 - ▶ $x \mapsto \frac{2}{1+e^{-x}} - 1$
- ▶ Иногда используют более сложные функции, взятые из кинематографа (filmic tone mapping)
- ▶ Эти функции часто позволяют динамически настраивать среднюю освещённость сцены (exposure, выдержка)

Reinhard operator



Filmic tone mapping curve (ACES)



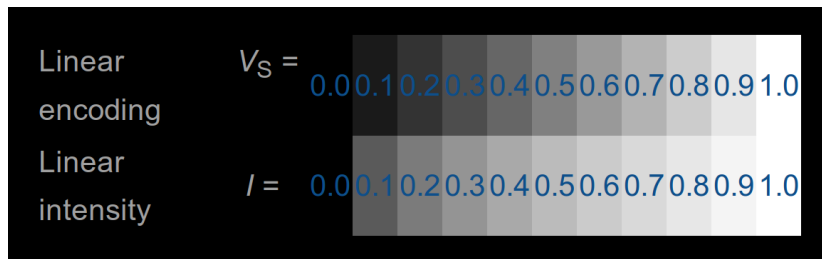
HDR & tone mapping: ссылки

- ▶ learnopengl.com/Advanced-Lighting/HDR
- ▶ skylum.com/blog/what-is-tone-mapping
- ▶ venerattech.com/what-is-hdr-tone-mapping

Гамма

- ▶ Обычно, интенсивность света I , излучаемого монитором, нелинейно зависит от значения V , записанного в пикселе

Линейное значение пикселя vs линейная интенсивность излучения



Гамма

- ▶ Обычно, интенсивность света I , излучаемого монитором, нелинейно зависит от значения V , записанного в пикселе
- ▶ Это лучше соответствует восприятию света человеком и даёт больше точности тёмным цветам, которые человек различает лучше

- ▶ Обычно, интенсивность света I , излучаемого монитором, нелинейно зависит от значения V , записанного в пикселе
- ▶ Это лучше соответствует восприятию света человеком и даёт больше точности тёмным цветам, которые человек различает лучше
- ▶ Почти всегда используется показательная функция:

$$I \sim V^\gamma \quad (1)$$

- ▶ Обычно, интенсивность света I , излучаемого монитором, нелинейно зависит от значения V , записанного в пикселе
- ▶ Это лучше соответствует восприятию света человеком и даёт больше точности тёмным цветам, которые человек различает лучше
- ▶ Почти всегда используется показательная функция:

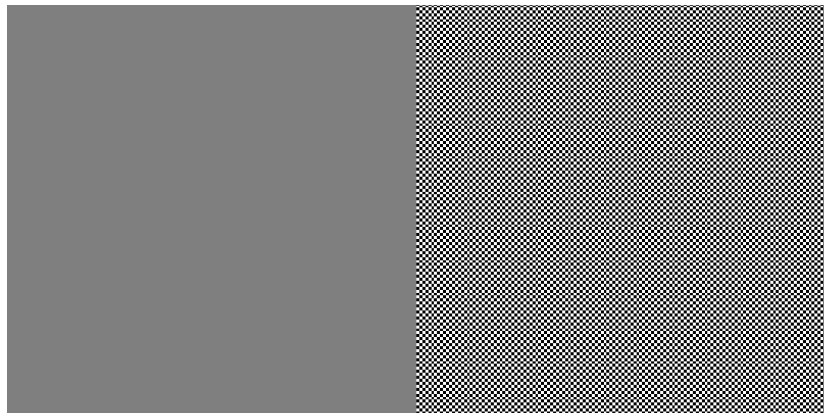
$$I \sim V^\gamma \quad (1)$$

- ▶ γ обычно равна 2.2 (некоторые компьютеры Macintosh использовали 1.8)

Проблемы гаммы

- ▶ Картинка может издалека выглядеть ярче, чем её усреднённый вариант (e.g. mipmap)

Серый (цвет=0.5) квадрат и квадрат с мелкой шахматной раскраской



Проблемы гаммы

- ▶ Картинка может издалека выглядеть ярче, чем её усреднённый вариант (e.g. mipmap)
- ▶ Искажается восприятие относительных яркостей, особенно при реалистичном рендеринге (e.g. объект в два раза ярче не будет выглядеть в два раза ярче)

Проблемы гаммы

- ▶ Картинка может издаleка выглядеть ярче, чем её усреднённый вариант (e.g. mipmap)
- ▶ Искaжается восприятие относительных яркостей, особенно при реалистичном рендеринге (e.g. объект в два раза ярче не будет выглядеть в два раза ярче)
- ▶ Неправильно выглядит освещение, наложение источников света, и т.д.

Коррекция гаммы (gamma-correction)

- ▶ Коррекция гаммы – общий термин для применения любых нелинейных преобразований над интенсивностью пикселя

Коррекция гаммы (gamma-correction)

- ▶ Коррекция гаммы – общий термин для применения любых нелинейных преобразований над интенсивностью пикселя
- ▶ В рендеринге под гамма-коррекцией обычно подразумевают применение обратного к $V^{2.2}$ преобразования, чтобы получить линейную зависимость выходящего излучения от значения пикселя

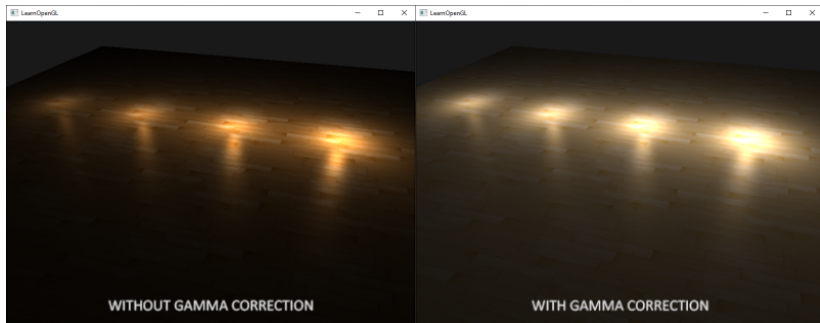
Коррекция гаммы (gamma-correction)

```
// Вычислили цвет пикселя  
// с учётом освещения  
vec3 color = ...;  
  
color = pow(color, vec3(1.0 / 2.2));
```

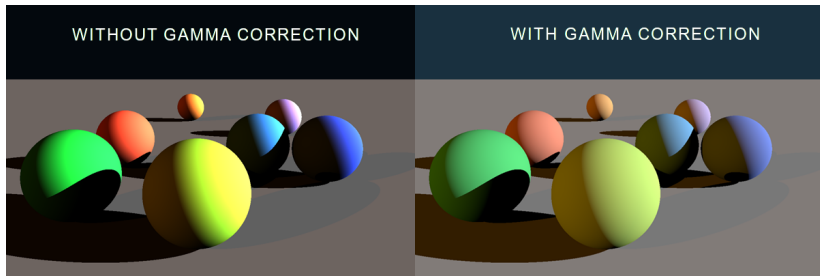
Эффекты коррекции гаммы



Эффекты коррекции гаммы



Эффекты коррекции гаммы



Эффекты коррекции гаммы

- ▶ Типичные эффекты гамма-коррекции:

Эффекты коррекции гаммы

- ▶ Типичные эффекты гамма-коррекции:
 - ▶ Картинка становится ярче (чем темнее цвет, тем больше прирост яркости)

Эффекты коррекции гаммы

- ▶ Типичные эффекты гамма-коррекции:
 - ▶ Картинка становится ярче (чем темнее цвет, тем больше прирост яркости)
 - ▶ Картинка становится менее контрастной

Эффекты коррекции гаммы

- ▶ Типичные эффекты гамма-коррекции:
 - ▶ Картинка становится ярче (чем темнее цвет, тем больше прирост яркости)
 - ▶ Картинка становится менее контрастной
 - ▶ Освещение выглядит правильнее

Эффекты коррекции гаммы

- ▶ Типичные эффекты гамма-коррекции:
 - ▶ Картинка становится ярче (чем темнее цвет, тем больше прирост яркости)
 - ▶ Картинка становится менее контрастной
 - ▶ Освещение выглядит правильнее
 - ▶ Переход от освещённой к неосвещённой области объекта выглядит более резким (как в реальности)

Коррекция гаммы: ссылки

- ▶ en.wikipedia.org/wiki/Gamma_correction
- ▶ [Whateverycodershouldknowaboutgamma](#)
- ▶ [Linear-spacelightning\(i.e.gamma\)](#)
- ▶ [Learnopengl.comtutorial](#)

- ▶ По тем же причинам, по которым существует нелинейная гамма у мониторов (отдать больше бит под тёмные цвета), хочется хранить текстуры не в сыром формате, а в гамма-преобразованном: значение пикселя V зависит от желаемой интенсивности I как $V \sim I^{\frac{1}{\gamma}}$

- ▶ По тем же причинам, по которым существует нелинейная гамма у мониторов (отдать больше бит под тёмные цвета), хочется хранить текстуры не в сыром формате, а в гамма-преобразованном: значение пикселя V зависит от желаемой интенсивности I как $V \sim I^{\frac{1}{\gamma}}$
- ▶ Такой формат хранения цвета называется sRGB
 - ▶ N.B. Точная формула преобразования sRGB отличается от $I^{\frac{1}{2.2}}$, но очень близка к ней

- ▶ По тем же причинам, по которым существует нелинейная гамма у мониторов (отдать больше бит под тёмные цвета), хочется хранить текстуры не в сыром формате, а в гамма-преобразованном: значение пикселя V зависит от желаемой интенсивности I как $V \sim I^{\frac{1}{\gamma}}$
- ▶ Такой формат хранения цвета называется sRGB
 - ▶ N.B. Точная формула преобразования sRGB отличается от $I^{\frac{1}{2.2}}$, но очень близка к ней
- ▶ Обычно изображения хранятся именно в таком формате

- ▶ По тем же причинам, по которым существует нелинейная гамма у мониторов (отдать больше бит под тёмные цвета), хочется хранить текстуры не в сыром формате, а в гамма-преобразованном: значение пикселя V зависит от желаемой интенсивности I как $V \sim I^{\frac{1}{\gamma}}$
- ▶ Такой формат хранения цвета называется sRGB
 - ▶ N.B. Точная формула преобразования sRGB отличается от $I^{\frac{1}{2.2}}$, но очень близка к ней
- ▶ Обычно изображения хранятся именно в таком формате
- ▶ Проверить формат можно любым редактором изображений или программой `identify` пакета `imagemagick`

- ▶ При чтении из sRGB-текстуры нужно возводить прочитанное значение в степень 2.2

- ▶ При чтении из sRGB-текстуры нужно возводить прочитанное значение в степень 2.2
- ▶ При записи в sRGB-текстуру нужно возводить записываемое значение в степень $1/2.2$

sRGB

- ▶ При чтении из sRGB-текстуры нужно возводить прочитанное значение в степень 2.2
- ▶ При записи в sRGB-текстуру нужно возводить записываемое значение в степень $1/2.2$
- ▶ В OpenGL есть поддержка sRGB для текстур и фреймбуферов

sRGB-текстуры

- ▶ Специальное значение `internal format` для текстуры (`GL_SRGB8` или `GL_SRGB8_ALPHA8`) означает, что текстура хранит sRGB-значения – они будут *автоматически* переведены в линейные значения (т.е. возведены в степень 2.2) при чтении из шейдера

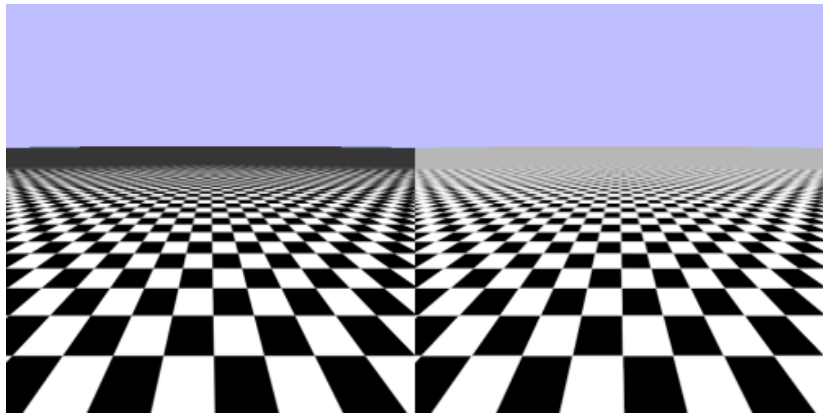
sRGB-текстуры

- ▶ Специальное значение `internal format` для текстуры (`GL_SRGB8` или `GL_SRGB8_ALPHA8`) означает, что текстура хранит sRGB-значения – они будут *автоматически* переведены в линейные значения (т.е. возведены в степень 2.2) при чтении из шейдера
- ▶ `glEnable(GL_FRAMEBUFFER_SRGB)` включит автоматическое обратное преобразование (возведение в степень $1/2.2$) при рисовании в sRGB-текстуру

sRGB-текстуры

- ▶ Специальное значение `internal format` для текстуры (`GL_SRGB8` или `GL_SRGB8_ALPHA8`) означает, что текстура хранит sRGB-значения – они будут *автоматически* переведены в линейные значения (т.е. возведены в степень 2.2) при чтении из шейдера
- ▶ `glEnable(GL_FRAMEBUFFER_SRGB)` включит автоматическое обратное преобразование (возведение в степень 1/2.2) при рисовании в sRGB-текстуру
- ▶ **N.B.:** `glGenerateMipmap` не обязан правильно обрабатывать sRGB-текстуры!

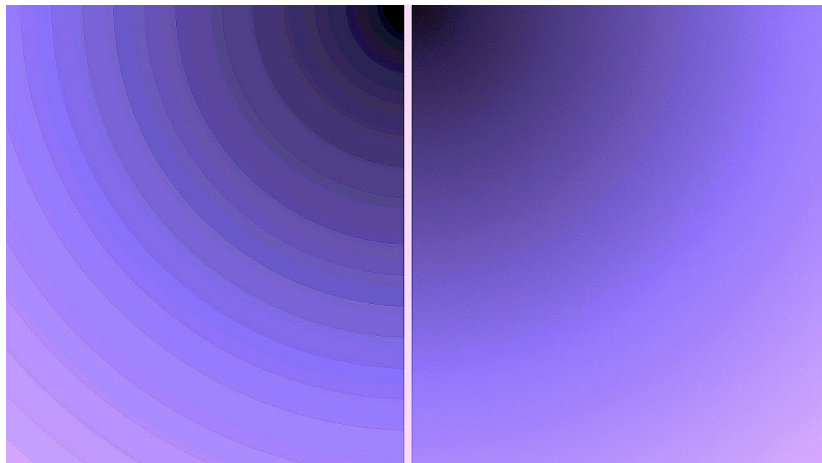
sRGB-correct mipmap



sRGB: ссылки

- ▶ en.wikipedia.org/wiki/SRGB
- ▶ [StackoverflowpostonsRGB](#)
- ▶ [sRGBframebuffers](#)

Color banding



Color banding

- ▶ Артефакт, когда чётко видна граница между областями, заполненными одним цветом

Color banding

- ▶ Артефакт, когда чётко видна граница между областями, заполненными одним цветом
- ▶ Обычно не сильно заметен, особенно после наложения текстур и пост-обработки

Color banding

- ▶ Артефакт, когда чётко видна граница между областями, заполненными одним цветом
- ▶ Обычно не сильно заметен, особенно после наложения текстур и пост-обработки
- ▶ Хорошо заметен на монотонных поверхностях (напр. небо)

Color banding

- ▶ Артефакт, когда чётко видна граница между областями, заполненными одним цветом
- ▶ Обычно не сильно заметен, особенно после наложения текстур и пост-обработки
- ▶ Хорошо заметен на монотонных поверхностях (напр. небо)
- ▶ Сильнее заметен с тёмными цветами (из-за особенностей человеческого зрения)

Color banding

- ▶ Артефакт, когда чётко видна граница между областями, заполненными одним цветом
- ▶ Обычно не сильно заметен, особенно после наложения текстур и пост-обработки
- ▶ Хорошо заметен на монотонных поверхностях (напр. небо)
- ▶ Сильнее заметен с тёмными цветами (из-за особенностей человеческого зрения)
- ▶ Может усиливаться при неаккуратной работе с форматами хранения и нелинейными преобразованиями

Color banding: пример возникновения

- ▶ Рисуем сцену, записываем линейную интенсивность в текстуру в формате GL_RGB8

Color banding: пример возникновения

- ▶ Рисуем сцену, записываем линейную интенсивность в текстуру в формате GL_RGB8
- ▶ Выводим сцену на экран с гамма-коррекцией: значения из текстуры возводятся в степень $1/2.2$

Color banding: пример возникновения

- ▶ Рисуем сцену, записываем линейную интенсивность в текстуру в формате GL_RGB8
- ▶ Выводим сцену на экран с гамма-коррекцией: значения из текстуры возводятся в степень $1/2.2$
- ▶ Значение текстуры 0 переходит в значение 0 на экране

Color banding: пример возникновения

- ▶ Рисуем сцену, записываем линейную интенсивность в текстуру в формате GL_RGB8
- ▶ Выводим сцену на экран с гамма-коррекцией: значения из текстуры возводятся в степень $1/2.2$
- ▶ Значение текстуры 0 переходит в значение 0 на экране
- ▶ Значение текстуры 1 переходит в значение $255 * (1/255)^{(1/2.2)} = 21$ на экране

Color banding: пример возникновения

- ▶ Рисуем сцену, записываем линейную интенсивность в текстуру в формате GL_RGB8
- ▶ Выводим сцену на экран с гамма-коррекцией: значения из текстуры возводятся в степень $1/2.2$
- ▶ Значение текстуры 0 переходит в значение 0 на экране
- ▶ Значение текстуры 1 переходит в значение $255 * (1/255)^{(1/2.2)} = 21$ на экране
- ▶ Колоссальная потеря точности: значения от 1 до 20 не используются!

Color banding: пример возникновения

- ▶ Рисуем сцену, записываем линейную интенсивность в текстуру в формате GL_RGB8
- ▶ Выводим сцену на экран с гамма-коррекцией: значения из текстуры возводятся в степень $1/2.2$
- ▶ Значение текстуры 0 переходит в значение 0 на экране
- ▶ Значение текстуры 1 переходит в значение $255 * (1/255)^{(1/2.2)} = 21$ на экране
- ▶ Колоссальная потеря точности: значения от 1 до 20 не используются!
- ▶ Для избавления можно увеличить битность промежуточной текстуры до GL_RGB16

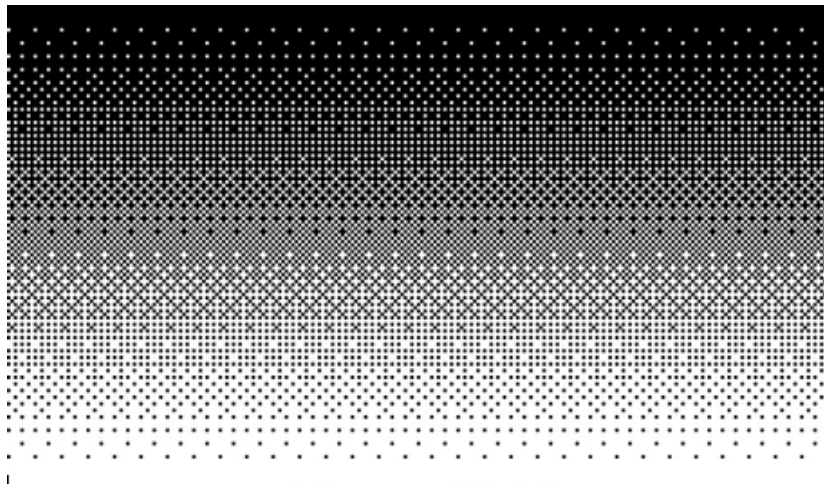
Color banding

- ▶ Banding, связанный с потерей точности, обычно решают увеличением точности

Color banding

- ▶ Banding, связанный с потерей точности, обычно решают увеличением точности
- ▶ Banding, связанный с ограниченной точностью самого экрана, обычно решают с помощью *дизеринга*

Dithering



Dithering

- ▶ Способ рисования градиентов (переходов между цветами) за счёт варьирования количества пикселей двух цветов

Dithering

- ▶ Способ рисования градиентов (переходов между цветами) за счёт варьирования количества пикселей двух цветов
- ▶ Работает только для больших (по размеру) градиентов

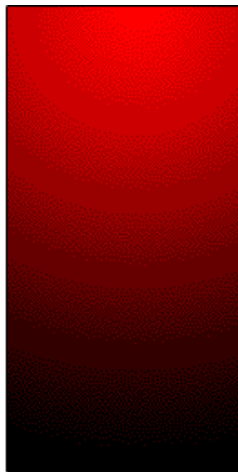
Dithering

- ▶ Способ рисования градиентов (переходов между цветами) за счёт варьирования количества пикселей двух цветов
- ▶ Работает только для больших (по размеру) градиентов
- ▶ Не зависит от точности

Dithering



8-bit gradient



8-bit gradient,
dithered

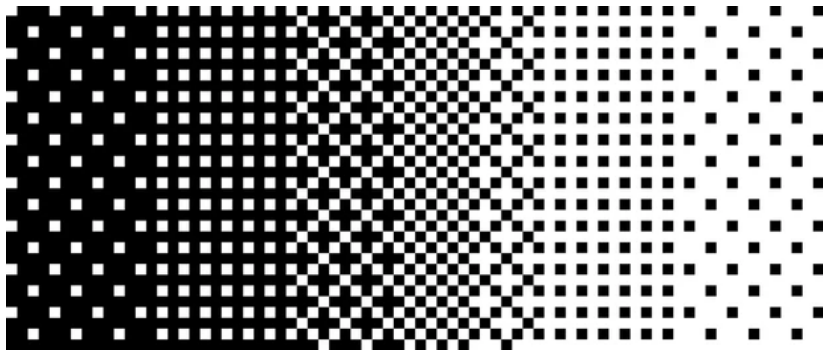


24-bit gradient

Dithering: реализация

- ▶ Допустим, мы рисуем в однобитное (чёрно-белое) изображение, и хотим добиться серого цвета с помощью дизеринга

Dithering



Dithering: реализация

- ▶ Допустим, мы рисуем в однобитное (чёрно-белое) изображение, и хотим добиться серого цвета с помощью дизеринга
- ▶ Нам нужен способ определить, какой из пикселей будет чёрным, а какой – белым

Dithering: реализация

- ▶ Допустим, мы рисуем в однобитное (чёрно-белое) изображение, и хотим добиться серого цвета с помощью дизеринга
- ▶ Нам нужен способ определить, какой из пикселей будет чёрным, а какой – белым
- ▶ При одноразовой обработке изображения можно оптимизировать паттерн дизеринга под конкретное изображение

Dithering: реализация

- ▶ Допустим, мы рисуем в однобитное (чёрно-белое) изображение, и хотим добиться серого цвета с помощью дизеринга
- ▶ Нам нужен способ определить, какой из пикселей будет чёрным, а какой – белым
- ▶ При одноразовой обработке изображения можно оптимизировать паттерн дизеринга под конкретное изображение
- ▶ В real-time графике это обычно делается с помощью т.н. dither mask / dither matrix (ordered dithering)

Dithering: реализация

- ▶ Dither mask – одноканальная текстура, хранящая для каждого пикселя пороговое значение, начиная с которого его надо рисовать белым

Dithering: реализация

- ▶ Dither mask – одноканальная текстура, хранящая для каждого пикселя пороговое значение, начиная с которого его надо рисовать белым
- ▶ Например, для серого цвета с яркостью 0.25 мы нарисуем белыми те пиксели, для которых значение в dither map ≤ 0.25

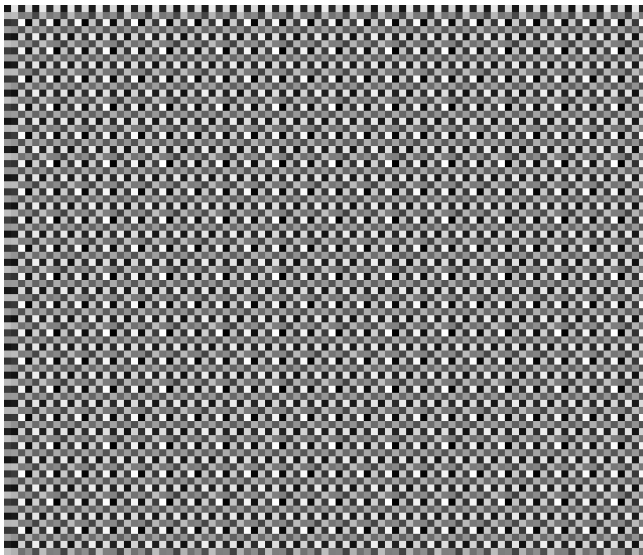
Dithering: реализация

- ▶ Dither mask – одноканальная текстура, хранящая для каждого пикселя пороговое значение, начиная с которого его надо рисовать белым
- ▶ Например, для серого цвета с яркостью 0.25 мы нарисуем белыми те пиксели, для которых значение в dither map ≤ 0.25
- ▶ Например, для серого цвета с яркостью 0.5 мы нарисуем белыми те пиксели, для которых значение в dither map ≤ 0.5

Dithering: реализация

- ▶ Dither mask – одноканальная текстура, хранящая для каждого пикселя пороговое значение, начиная с которого его надо рисовать белым
- ▶ Например, для серого цвета с яркостью 0.25 мы нарисуем белыми те пиксели, для которых значение в dither map ≤ 0.25
- ▶ Например, для серого цвета с яркостью 0.5 мы нарисуем белыми те пиксели, для которых значение в dither map ≤ 0.5
- ▶ Например, для серого цвета с яркостью 0.75 мы нарисуем белыми те пиксели, для которых значение в dither map ≤ 0.75

Dither mask



Dithering: реализация

- ▶ Для дitherинга при рисовании в 8-битный буфер:
 - ▶ Хотим записать значение $v \in [0, 1]$
 - ▶ Вычисляем $v' = 255 \cdot v$
 - ▶ Вычисляем $v_0 = \text{floor}(v')$
 - ▶ Вычисляем $v_1 = v_0 + 1$
 - ▶ Вычисляем $dv = v' - v_0$
 - ▶ Если значение в dither mask меньше dv , рисуем значение $v_1/255$, иначе $v_0/255$

Dithering: реализация

- ▶ Для дизеринга при рисовании в 8-битный буфер:
 - ▶ Хотим записать значение $v \in [0, 1]$
 - ▶ Вычисляем $v' = 255 \cdot v$
 - ▶ Вычисляем $v_0 = \text{floor}(v')$
 - ▶ Вычисляем $v_1 = v_0 + 1$
 - ▶ Вычисляем $dv = v' - v_0$
 - ▶ Если значение в dither mask меньше dv , рисуем значение $v_1/255$, иначе $v_0/255$
- ▶ Дизеринг нужно делать для каждого канала (RGB) по отдельности

Dithering: реализация

- ▶ Для дизеринга при рисовании в 8-битный буфер:
 - ▶ Хотим записать значение $v \in [0, 1]$
 - ▶ Вычисляем $v' = 255 \cdot v$
 - ▶ Вычисляем $v_0 = \text{floor}(v')$
 - ▶ Вычисляем $v_1 = v_0 + 1$
 - ▶ Вычисляем $dv = v' - v_0$
 - ▶ Если значение в dither mask меньше dv , рисуем значение $v_1/255$, иначе $v_0/255$
- ▶ Дизеринг нужно делать для каждого канала (RGB) по отдельности
- ▶ Обычно dither mask имеет маленький размер (напр. 16x16) и циклически (GL_REPEAT) повторяется на весь экран; её пиксели пробегают все возможные значения от 0 до 255

Dithering: реализация

```
vec3 color = ...;

vec3 c = color * 255.0;
vec3 c0 = floor(c);
vec3 c1 = c0 + vec3(1.0);
vec3 dc = c - c0;

float threshold = texture(dither_mask, pixel_coord);

color = c0 / 255.0;
if (dc.r > threshold) color.r = c1.r / 255.0;
if (dc.g > threshold) color.g = c1.g / 255.0;
if (dc.b > threshold) color.b = c1.b / 255.0;
```

Генерация dither mask

- ▶ Bayer dithering – очень быстро генерируется, могут быть заметны артефакты из-за регулярности паттерна

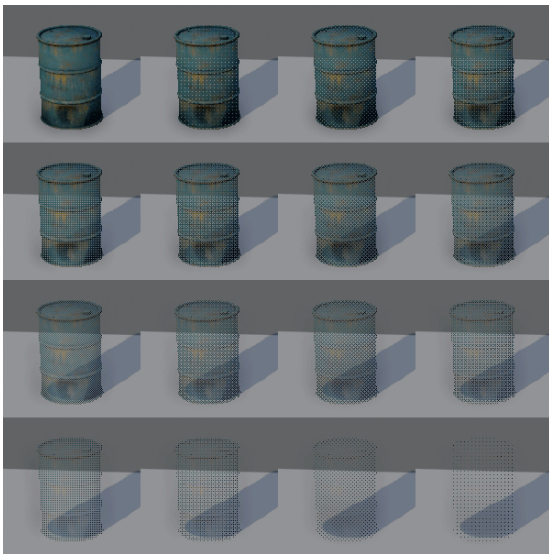
Генерация dither mask

- ▶ Bayer dithering – очень быстро генерируется, могут быть заметны артефакты из-за регулярности паттерна
- ▶ Void-and-cluster – использует медленный blue noise для генерации маски, лучше распределение пикселей

Сравнение bayer и void-and-cluster



Screen-door transparency



Screen-door transparency

- ▶ Дизеринг часто применяют как дешёвый аналог прозрачности

Screen-door transparency

- ▶ Дизеринг часто применяют как дешёвый аналог прозрачности
- ▶ Если значение в альфа-канале больше значения из dither mask, то рисуем пиксель, иначе – не рисуем (discard)

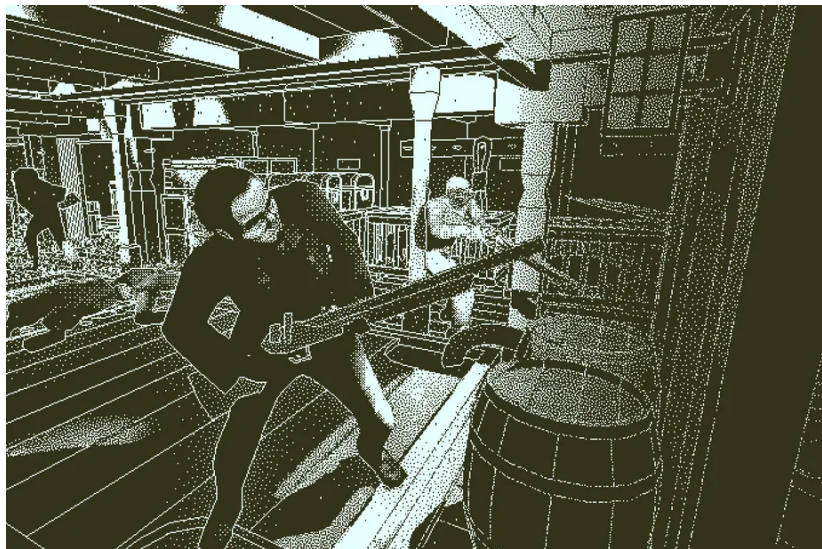
Screen-door transparency

- ▶ Дизеринг часто применяют как дешёвый аналог прозрачности
- ▶ Если значение в альфа-канале больше значения из dither mask, то рисуем пиксель, иначе – не рисуем (discard)
- ▶ Не требует сортировки объектов по расстоянию, работает с deferred shading'ом

Screen-door transparency

- ▶ Дизеринг часто применяют как дешёвый аналог прозрачности
- ▶ Если значение в альфа-канале больше значения из dither mask, то рисуем пиксель, иначе – не рисуем (discard)
- ▶ Не требует сортировки объектов по расстоянию, работает с deferred shading'ом
- ▶ Выглядит заметно хуже, часто применяется для временно прозрачных объектов (появляющихся/исчезающих), далёких объектов (деревья, кусты)

Return of the Obra Dinn (2018)



Dithering: ссылки

- ▶ en.wikipedia.org/wiki/Dither
- ▶ surma.dev/things/ditherpunk
- ▶ alex-charlton.com/posts/Dithering_on_the_GPU
- ▶ Dithering in Return of the Obra Dinn