

Компьютерная графика

Лекция 6: Ошибки OpenGL, расширения OpenGL,
blending, stencil buffer, framebuffer, renderbuffer,
пост-обработка

2023

Ошибки OpenGL

- Часто драйвер может легко понять, что в определённом OpenGL-вызове содержится ошибка

Ошибки OpenGL

- Часто драйвер может легко понять, что в определённом OpenGL-вызове содержится ошибка
 - `glTexImage2D` с параметром `target`, не являющимся одним из типов текстур

Ошибки OpenGL

- Часто драйвер может легко понять, что в определённом OpenGL-вызове содержится ошибка
 - `glTexImage2D` с параметром `target`, не являющимся одним из типов текстур
 - `glTexParameter`i устанавливающая `mag filter` в что-то отличное от `GL_LINEAR` или `GL_NEAREST`

Ошибки OpenGL

- Часто драйвер может легко понять, что в определённом OpenGL-вызове содержится ошибка
 - `glTexImage2D` с параметром `target`, не являющимся одним из типов текстур
 - `glTexParameter`i устанавливающая `mag filter` в что-то отличное от `GL_LINEAR` или `GL_NEAREST`
 - `glBindBuffer` с ID буфера, который не был получен через `glGenBuffers`

Ошибки OpenGL

- Часто драйвер может легко понять, что в определённом OpenGL-вызове содержится ошибка
 - `glTexImage2D` с параметром `target`, не являющимся одним из типов текстур
 - `glTexParameterI` устанавливающая `mag filter` в что-то отличное от `GL_LINEAR` или `GL_NEAREST`
 - `glBindBuffer` с ID буфера, который не был получен через `glGenBuffers`
 - etc.

Ошибки OpenGL

- Часто драйвер может легко понять, что в определённом OpenGL-вызове содержится ошибка
 - `glTexImage2D` с параметром `target`, не являющимся одним из типов текстур
 - `glTexParameter`i устанавливающая `mag filter` в что-то отличное от `GL_LINEAR` или `GL_NEAREST`
 - `glBindBuffer` с ID буфера, который не был получен через `glGenBuffers`
 - etc.
- В таких случаях генерируется ошибка как особое значение типа `GLenum`

Ошибки OpenGL

- Часто драйвер может легко понять, что в определённом OpenGL-вызове содержится ошибка
 - `glTexImage2D` с параметром `target`, не являющимся одним из типов текстур
 - `glTexParameter`i устанавливающая `mag filter` в что-то отличное от `GL_LINEAR` или `GL_NEAREST`
 - `glBindBuffer` с ID буфера, который не был получен через `glGenBuffers`
 - etc.
- В таких случаях генерируется ошибка как особое значение типа `GLenum`
- Как правило, вызвавшая ошибку операция не выполняется

Ошибки OpenGL

- Часто драйвер может легко понять, что в определённом OpenGL-вызове содержится ошибка
 - `glTexImage2D` с параметром `target`, не являющимся одним из типов текстур
 - `glTexParameter`i устанавливающая `mag filter` в что-то отличное от `GL_LINEAR` или `GL_NEAREST`
 - `glBindBuffer` с ID буфера, который не был получен через `glGenBuffers`
 - etc.
- В таких случаях генерируется ошибка как особое значение типа `GLenum`
- Как правило, вызвавшая ошибку операция не выполняется
- `glGetError()` – получить значение ошибки, если она была

Ошибки OpenGL

Возможные ошибки:

- GL_NO_ERROR – ошибки нет

Ошибки OpenGL

Возможные ошибки:

- GL_NO_ERROR – ошибки нет
- GL_INVALID_ENUM – недопустимое значения перечисления
(например, GL_TEXTURE_2D как первый параметр glBindBuffer)

Ошибки OpenGL

Возможные ошибки:

- GL_NO_ERROR – ошибки нет
- GL_INVALID_ENUM – недопустимое значения перечисления (например, GL_TEXTURE_2D как первый параметр glBindBuffer)
- GL_INVALID_VALUE – недопустимое значение числового аргумента (например, отрицательная ширина текстуры в glTexImage2D)

Ошибки OpenGL

Возможные ошибки:

- GL_NO_ERROR – ошибки нет
- GL_INVALID_ENUM – недопустимое значения перечисления (например, GL_TEXTURE_2D как первый параметр glBindBuffer)
- GL_INVALID_VALUE – недопустимое значение числового аргумента (например, отрицательная ширина текстуры в glTexImage2D)
- GL_INVALID_OPERATION – недопустимая операция (например, glUniform1i при отсутствии текущей шейдерной программы)

Ошибки OpenGL

Возможные ошибки:

- GL_NO_ERROR – ошибки нет
- GL_INVALID_ENUM – недопустимое значения перечисления (например, GL_TEXTURE_2D как первый параметр glBindBuffer)
- GL_INVALID_VALUE – недопустимое значение числового аргумента (например, отрицательная ширина текстуры в glTexImage2D)
- GL_INVALID_OPERATION – недопустимая операция (например, glUniform1i при отсутствии текущей шейдерной программы)
- GL_INVALID_FRAMEBUFFER_OPERATION – операция рисования/чтения пикселей с невалидным framebuffer'ом (о них чуть позже)

Ошибки OpenGL

Возможные ошибки:

- GL_NO_ERROR – ошибки нет
- GL_INVALID_ENUM – недопустимое значения перечисления (например, GL_TEXTURE_2D как первый параметр glBindBuffer)
- GL_INVALID_VALUE – недопустимое значение числового аргумента (например, отрицательная ширина текстуры в glTexImage2D)
- GL_INVALID_OPERATION – недопустимая операция (например, glUniform1i при отсутствии текущей шейдерной программы)
- GL_INVALID_FRAMEBUFFER_OPERATION – операция рисования/чтения пикселей с невалидным framebuffer'ом (о них чуть позже)
- GL_OUT_OF_MEMORY – закончилась память на GPU (может быть вызвана любой OpenGL-командой, обычно не обрабатывается)

Ошибки OpenGL

- Документация к каждой функции описывает все возможные ошибки, которые эта функция может вызвать, и в каких случаях

Ошибки OpenGL

- Документация к каждой функции описывает все возможные ошибки, которые эта функция может вызвать, и в каких случаях
 - **N.B.** GL_OUT_OF_MEMORY нигде не указан, потому что может появиться где угодно

Ошибки OpenGL

- Документация к каждой функции описывает все возможные ошибки, которые эта функция может вызвать, и в каких случаях
 - **N.B.** GL_OUT_OF_MEMORY нигде не указан, потому что может появиться где угодно
- Не все ошибки покрываются этим механизмом

Ошибки OpenGL

- Документация к каждой функции описывает все возможные ошибки, которые эта функция может вызвать, и в каких случаях
 - **N.B.** `GL_OUT_OF_MEMORY` нигде не указан, потому что может появиться где угодно
- Не все ошибки покрываются этим механизмом
 - Например, `glDrawArrays` с правильно настроенным VAO но с пустым VBO с вершинами

Ошибки OpenGL

- Документация к каждой функции описывает все возможные ошибки, которые эта функция может вызвать, и в каких случаях
 - **N.B.** `GL_OUT_OF_MEMORY` нигде не указан, потому что может появиться где угодно
- Не все ошибки покрываются этим механизмом
 - Например, `glDrawArrays` с правильно настроенным VAO но с пустым VBO с вершинами
- Нет информации о том, какая именно функция вызвала ошибку (любая из тех, что были вызваны до `glGetError`)

Ошибки OpenGL

- Документация к каждой функции описывает все возможные ошибки, которые эта функция может вызвать, и в каких случаях
 - **N.B.** `GL_OUT_OF_MEMORY` нигде не указан, потому что может появиться где угодно
- Не все ошибки покрываются этим механизмом
 - Например, `glDrawArrays` с правильно настроенным VAO но с пустым VBO с вершинами
- Нет информации о том, какая именно функция вызвала ошибку (любая из тех, что были вызваны до `glGetError`)
 - ⇒ Придётся расставлять проверку после каждого OpenGL-вызова

Ошибки OpenGL

- Драйвер может хранить один флаг ошибки, и пропускать все последующие ошибки до вызова `glGetError`

Ошибки OpenGL

- Драйвер может хранить один флаг ошибки, и пропускать все последующие ошибки до вызова `glGetError`
- Драйвер может хранить несколько флагов, и `glGetError` возвращает и очищает любой из них

Ошибки OpenGL

- Драйвер может хранить один флаг ошибки, и пропускать все последующие ошибки до вызова `glGetError`
- Драйвер может хранить несколько флагов, и `glGetError` возвращает и очищает любой из них
- Драйвер может хранить очередь ошибок, и `glGetError` возвращает их в порядке появления

Ошибки OpenGL

- Драйвер может хранить один флаг ошибки, и пропускать все последующие ошибки до вызова `glGetError`
- Драйвер может хранить несколько флагов, и `glGetError` возвращает и очищает любой из них
- Драйвер может хранить очередь ошибок, и `glGetError` возвращает их в порядке появления
- \Rightarrow Чтобы очистить ошибки, нужно вызывать `glGetError` в цикле:

```
while (glGetError() != GL_NO_ERROR);
```

Ошибки OpenGL

- OpenGL 4.3+ (или расширение GL_ARB_debug_output): более удобный механизм, `glDebugMessageCallback`

Ошибки OpenGL

- OpenGL 4.3+ (или расширение GL_ARB_debug_output): более удобный механизм, `glDebugMessageCallback`
- khronos.org/opengl/wiki/OpenGL_Error
- docs.gl/gl3/glGetError

Расширения OpenGL

- Предоставляют дополнительную функциональность за рамками возможностей конкретной версии OpenGL

Расширения OpenGL

- Предоставляют дополнительную функциональность за рамками возможностей конкретной версии OpenGL
 - Конкретный производитель выпустил новую функциональность

Расширения OpenGL

- Предоставляют дополнительную функциональность за рамками возможностей конкретной версии OpenGL
 - Конкретный производитель выпустил новую функциональность
 - Функциональность доступна на большинстве реализаций OpenGL, но ещё не успела войти в новую версию OpenGL

Расширения OpenGL

- Предоставляют дополнительную функциональность за рамками возможностей конкретной версии OpenGL
 - Конкретный производитель выпустил новую функциональность
 - Функциональность доступна на большинстве реализаций OpenGL, но ещё не успела войти в новую версию OpenGL
 - Функциональность доступна в новой версии OpenGL, но крайне распространена и хочется ей пользоваться из старой версии

Расширения OpenGL

- Имя расширения имеет особый префикс:

Расширения OpenGL

- Имя расширения имеет особый префикс:
 - ARB (*Architectural Review Board*) – функциональность, которая (скорее всего) войдёт в следующий стандарт

Расширения OpenGL

- Имя расширения имеет особый префикс:
 - ARB (*Architectural Review Board*) – функциональность, которая (скорее всего) войдёт в следующий стандарт
 - EXT – широко распространённая функциональность

Расширения OpenGL

- Имя расширения имеет особый префикс:
 - ARB (*Architectural Review Board*) – функциональность, которая (скорее всего) войдёт в следующий стандарт
 - EXT – широко распространённая функциональность
 - NV – расширение от Nvidia (возможно, доступно и на других видеокартах)

Расширения OpenGL

- Имя расширения имеет особый префикс:
 - ARB (*Architectural Review Board*) – функциональность, которая (скорее всего) войдёт в следующий стандарт
 - EXT – широко распространённая функциональность
 - NV – расширение от Nvidia (возможно, доступно и на других видеокартах)
 - AMD – расширение от AMD (возможно, доступно и на других видеокартах)

Расширения OpenGL

- Имя расширения имеет особый префикс:
 - ARB (*Architectural Review Board*) – функциональность, которая (скорее всего) войдёт в следующий стандарт
 - EXT – широко распространённая функциональность
 - NV – расширение от Nvidia (возможно, доступно и на других видеокартах)
 - AMD – расширение от AMD (возможно, доступно и на других видеокартах)
 - APPLE – расширение от APPLE (возможно, доступно и на других видеокартах)

Расширения OpenGL

- Имя расширения имеет особый префикс:
 - ARB (*Architectural Review Board*) – функциональность, которая (скорее всего) войдёт в следующий стандарт
 - EXT – широко распространённая функциональность
 - NV – расширение от Nvidia (возможно, доступно и на других видеокартах)
 - AMD – расширение от AMD (возможно, доступно и на других видеокартах)
 - APPLE – расширение от APPLE (возможно, доступно и на других видеокартах)
 - И т.д.

Расширения OpenGL

- Расширение – набор констант и функций (как и конкретная версия OpenGL)

Расширения OpenGL

- Расширение – набор констант и функций (как и конкретная версия OpenGL)
- Функции нужно загружать так же, как и функции самого OpenGL

Расширения OpenGL

- Расширение – набор констант и функций (как и конкретная версия OpenGL)
- Функции нужно загружать так же, как и функции самого OpenGL
- Константы и перечисления заканчиваются на суффикс в зависимости от типа расширения:
 - ARB_debug_output: glDebugMessageCallbackARB,
GL_DEBUG_SEVERITY_HIGH_ARB
 - EXT_texture_filter_anisotropic:
GL_TEXTURE_MAX_ANISOTROPY_EXT
 - NV_texture_barrier: glTextureBarrierNV

Расширения OpenGL

- Расширение – набор констант и функций (как и конкретная версия OpenGL)
- Функции нужно загружать так же, как и функции самого OpenGL
- Константы и перечисления заканчиваются на суффикс в зависимости от типа расширения:
 - ARB_debug_output: glDebugMessageCallbackARB,
GL_DEBUG_SEVERITY_HIGH_ARB
 - EXT_texture_filter_anisotropic:
GL_TEXTURE_MAX_ANISOTROPY_EXT
 - NV_texture_barrier: glTextureBarrierNV
- Исключение: *core extensions* – предоставляют функциональность новых версий OpenGL в старых версиях OpenGL
 - Имеют префикс ARB
 - Не имеют суффиксов в названиях функций и констант

Расширения OpenGL

- Получить список поддерживаемых расширений:

```
GLint numExtensions;
glGetIntegerv(GL_NUM_EXTENSIONS, &numExtensions);
for (GLint i = 0; i < numExtensions; ++i) {
    std::cout << glGetStringi(GL_EXTENSIONS, i) << "\n";
}
```

Расширения OpenGL

- Получить список поддерживаемых расширений:

```
GLint numExtensions;
glGetIntegerv(GL_NUM_EXTENSIONS, &numExtensions);
for (GLint i = 0; i < numExtensions; ++i) {
    std::cout << glGetStringi(GL_EXTENSIONS, i) << "\n";
}
```

- GLEW загружает их автоматически:

```
if (GLEW_EXT_texture_filter_anisotropic) {
    std::cout << "Anisotropic filtering is supported\n";
}
```

Расширения OpenGL

- khronos.org/opengl/wiki/OpenGL_Extension
- khronos.org/registry/OpenGL/index_gl.php – список всех зарегистрированных расширений

Blending (смешивание)

- По умолчанию результат фрагментного шейдера (`layout (location = 0) vec4 out_color;`) записывается в пиксель экрана, стирая то, что было в нём до этого

Blending (смешивание)

- По умолчанию результат фрагментного шейдера (`layout (location = 0) vec4 out_color;`) записывается в пиксель экрана, стирая то, что было в нём до этого
- Иногда мы хотим ‘смешать’ результат и пиксель экрана, и записать результат смешивания

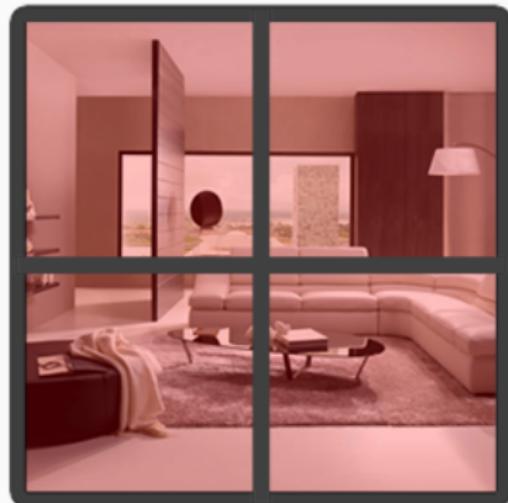
Blending (смешивание)

- По умолчанию результат фрагментного шейдера (`layout (location = 0) vec4 out_color;`) записывается в пиксель экрана, стирая то, что было в нём до этого
- Иногда мы хотим ‘смешать’ результат и пиксель экрана, и записать результат смешивания
 - Полупрозрачные объекты

Полупрозрачность

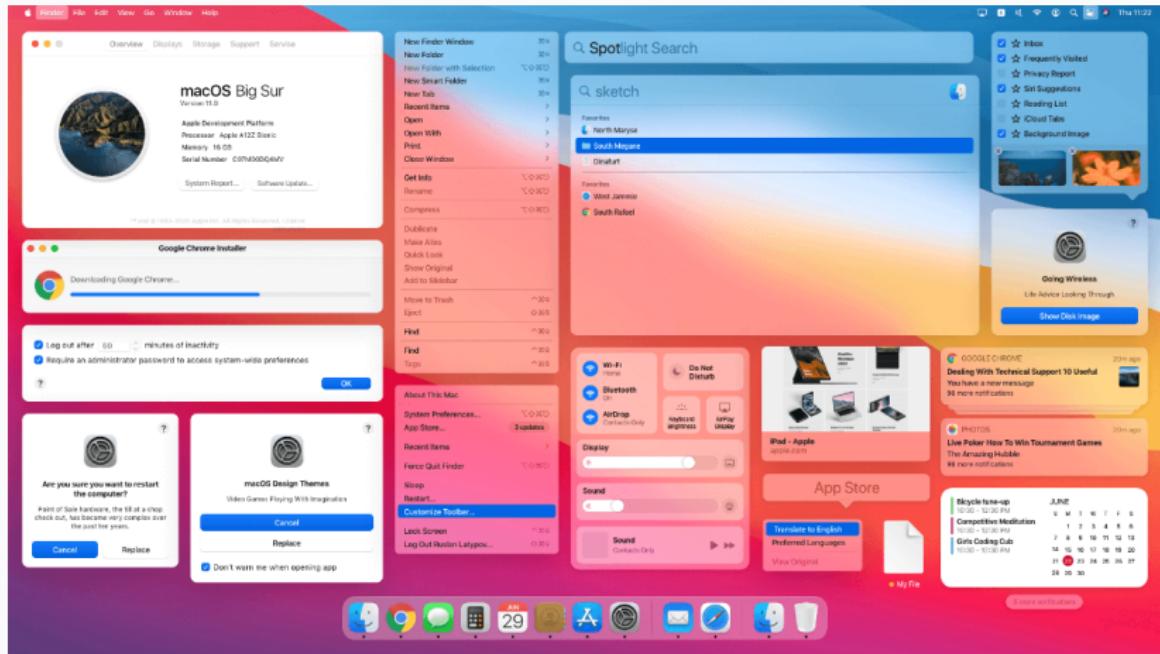


Full transparent window



Partially transparent window

Полупрозрачность



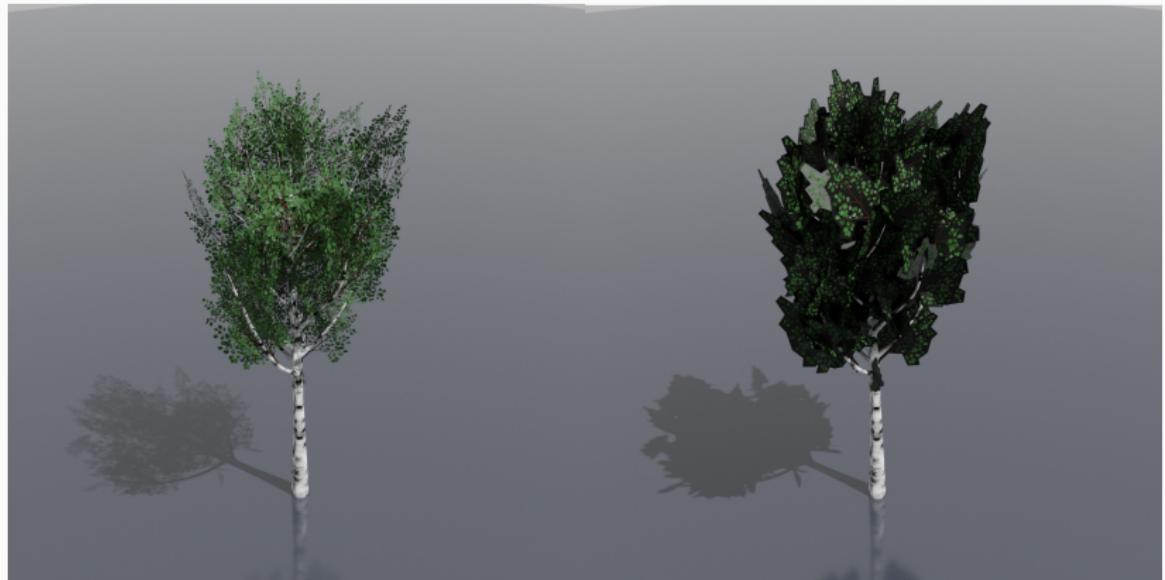
Blending (смешивание)

- По умолчанию результат фрагментного шейдера (`layout (location = 0) vec4 out_color;`) записывается в пиксель экрана, стирая то, что было в нём до этого
- Иногда мы хотим ‘смешать’ результат и пиксель экрана, и записать результат смешивания
 - Полупрозрачные объекты

Blending (смешивание)

- По умолчанию результат фрагментного шейдера (`layout (location = 0) vec4 out_color;`) записывается в пиксель экрана, стирая то, что было в нём до этого
- Иногда мы хотим ‘смешать’ результат и пиксель экрана, и записать результат смешивания
 - Полупрозрачные объекты
 - Растительность

Деревья



Blending (смешивание)

- По умолчанию результат фрагментного шейдера (`layout (location = 0) vec4 out_color;`) записывается в пиксель экрана, стирая то, что было в нём до этого
- Иногда мы хотим ‘смешать’ результат и пиксель экрана, и записать результат смешивания
 - Полупрозрачные объекты
 - Растительность

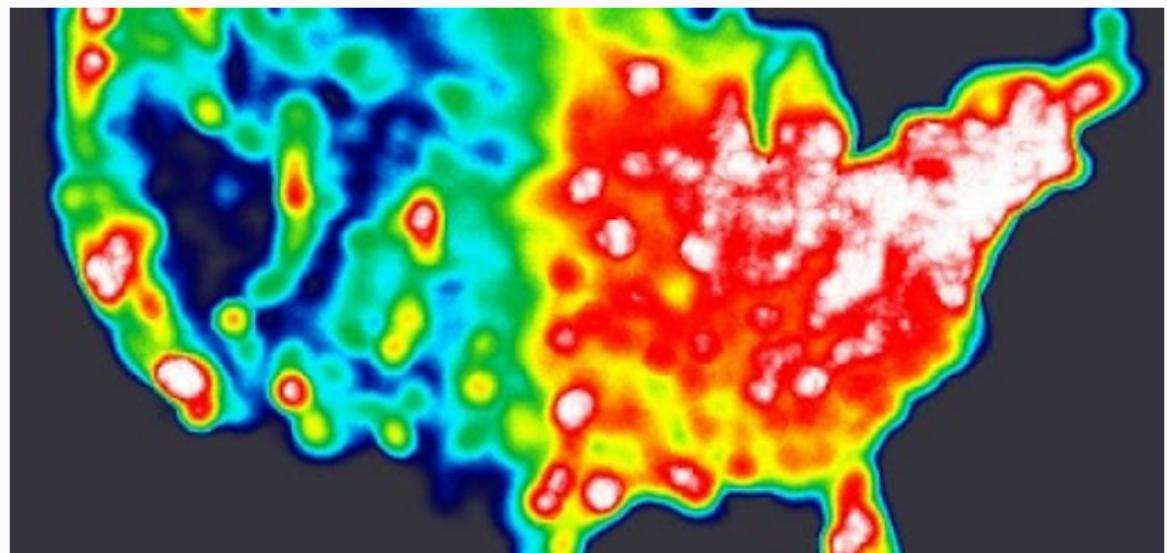
Blending (смешивание)

- По умолчанию результат фрагментного шейдера (`layout (location = 0) vec4 out_color;`) записывается в пиксель экрана, стирая то, что было в нём до этого
- Иногда мы хотим ‘смешать’ результат и пиксель экрана, и записать результат смешивания
 - Полупрозрачные объекты
 - Растительность
 - Алгоритмы освещения и теней

Blending (смешивание)

- По умолчанию результат фрагментного шейдера (`layout (location = 0) vec4 out_color;`) записывается в пиксель экрана, стирая то, что было в нём до этого
- Иногда мы хотим ‘смешать’ результат и пиксель экрана, и записать результат смешивания
 - Полупрозрачные объекты
 - Растительность
 - Алгоритмы освещения и теней
 - Heatmaps

Heatmap

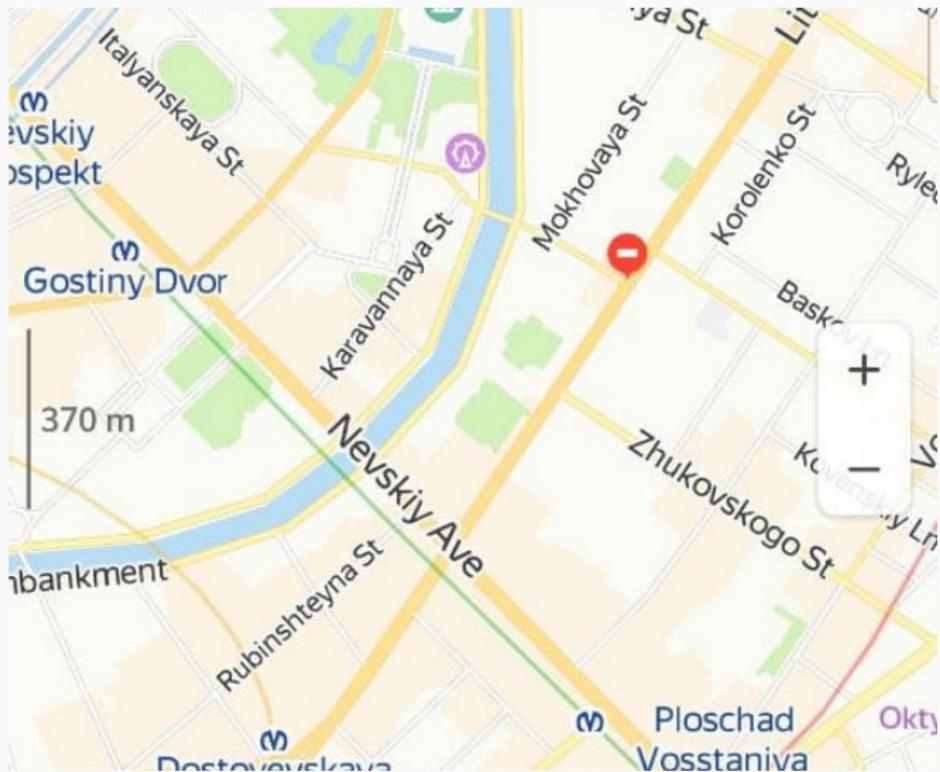


Blending (смешивание)

- По умолчанию результат фрагментного шейдера (`layout (location = 0) vec4 out_color;`) записывается в пиксель экрана, стирая то, что было в нём до этого
- Иногда мы хотим ‘смешать’ результат и пиксель экрана, и записать результат смешивания
 - Полупрозрачные объекты
 - Растительность
 - Алгоритмы освещения и теней
 - Heatmaps

Blending (смешивание)

- По умолчанию результат фрагментного шейдера (`layout (location = 0) vec4 out_color;`) записывается в пиксель экрана, стирая то, что было в нём до этого
- Иногда мы хотим ‘смешать’ результат и пиксель экрана, и записать результат смешивания
 - Полупрозрачные объекты
 - Растительность
 - Алгоритмы освещения и теней
 - Heatmaps
 - Ручное сглаживание



Blending (смешивание)

- По умолчанию результат фрагментного шейдера (`layout (location = 0) vec4 out_color;`) записывается в пиксель экрана, стирая то, что было в нём до этого
- Иногда мы хотим ‘смешать’ результат и пиксель экрана, и записать результат смешивания
 - Полупрозрачные объекты
 - Растительность
 - Алгоритмы освещения и теней
 - Heatmaps
 - Ручное сглаживание

Blending (смешивание)

- По умолчанию результат фрагментного шейдера (`layout (location = 0) vec4 out_color;`) записывается в пиксель экрана, стирая то, что было в нём до этого
- Иногда мы хотим ‘смешать’ результат и пиксель экрана, и записать результат смешивания
 - Полупрозрачные объекты
 - Растительность
 - Алгоритмы освещения и теней
 - Heatmaps
 - Ручное сглаживание
 - И т.д.

Blending (смешивание)

- Включается/выключается: `glEnable(GL_BLEND)`

Blending (смешивание)

- Включается/выключается: `glEnable(GL_BLEND)`
- Уравнение blending'a:

$$dst \leftarrow f(C_{src} \cdot src, C_{dst} \cdot dst)$$

Blending (смешивание)

- Включается/выключается: `glEnable(GL_BLEND)`
- Уравнение blending'a:

$$dst \leftarrow f(C_{src} \cdot src, C_{dst} \cdot dst)$$

- src – результат фрагментного шейдера

Blending (смешивание)

- Включается/выключается: `glEnable(GL_BLEND)`
- Уравнение blending'a:

$$dst \leftarrow f(C_{src} \cdot src, C_{dst} \cdot dst)$$

- src – результат фрагментного шейдера
- dst – пиксель на экране

Blending (смешивание)

- Включается/выключается: `glEnable(GL_BLEND)`
- Уравнение blending'a:

$$dst \leftarrow f(C_{src} \cdot src, C_{dst} \cdot dst)$$

- src – результат фрагментного шейдера
- dst – пиксель на экране
- f – настраиваемая функция

Blending (смешивание)

- Включается/выключается: `glEnable(GL_BLEND)`
- Уравнение blending'a:

$$dst \leftarrow f(C_{src} \cdot src, C_{dst} \cdot dst)$$

- src – результат фрагментного шейдера
- dst – пиксель на экране
- f – настраиваемая функция
- C_{src} и C_{dst} – настраиваемые веса

Blending (смешивание)

- Настройка функции f : `glBlendEquation(GLenum equation)`:

Blending (смешивание)

- Настройка функции f : `glBlendEquation(GLenum equation)`:
 - `GL_FUNC_ADD`: $f(src, dst) = src + dst$

Blending (смешивание)

- Настройка функции f : `glBlendEquation(GLenum equation)`:
 - `GL_FUNC_ADD`: $f(src, dst) = src + dst$
 - `GL_FUNC_SUBTRACT`: $f(src, dst) = src - dst$

Blending (смешивание)

- Настройка функции f : `glBlendEquation(GLenum equation)`:
 - `GL_FUNC_ADD`: $f(src, dst) = src + dst$
 - `GL_FUNC_SUBTRACT`: $f(src, dst) = src - dst$
 - `GL_FUNC_REVERSE_SUBTRACT`: $f(src, dst) = dst - src$

Blending (смешивание)

- Настройка функции f : `glBlendEquation(GLenum equation)`:
 - `GL_FUNC_ADD`: $f(src, dst) = src + dst$
 - `GL_FUNC_SUBTRACT`: $f(src, dst) = src - dst$
 - `GL_FUNC_REVERSE_SUBTRACT`: $f(src, dst) = dst - src$
 - `GL_MIN`: $f(src, dst) = \min(src, dst)$

Blending (смешивание)

- Настройка функции f : `glBlendEquation(GLenum equation)`:
 - `GL_FUNC_ADD`: $f(src, dst) = src + dst$
 - `GL_FUNC_SUBTRACT`: $f(src, dst) = src - dst$
 - `GL_FUNC_REVERSE_SUBTRACT`: $f(src, dst) = dst - src$
 - `GL_MIN`: $f(src, dst) = \min(src, dst)$
 - `GL_MAX`: $f(src, dst) = \max(src, dst)$

Blending (смешивание)

- Настройка весов C_{src} и C_{dst} :

```
glBlendFunc(GLenum src, GLenum dst):
```

Blending (смешивание)

- Настройка весов C_{src} и C_{dst} :
`glBlendFunc(GLenum src, GLenum dst):`
 - `GL_ZERO`: $C = 0$

Blending (смешивание)

- Настройка весов C_{src} и C_{dst} :

```
glBlendFunc(GLenum src, GLenum dst):
```

- GL_ZERO: $C = 0$
- GL_ONE: $C = 1$

Blending (смешивание)

- Настройка весов C_{src} и C_{dst} :

```
glBlendFunc(GLenum src, GLenum dst):
```

- GL_ZERO: $C = 0$
- GL_ONE: $C = 1$
- GL_SRC_COLOR: $C = src$

Blending (смешивание)

- Настройка весов C_{src} и C_{dst} :

```
glBlendFunc(GLenum src, GLenum dst):
```

- GL_ZERO: $C = 0$
- GL_ONE: $C = 1$
- GL_SRC_COLOR: $C = src$
- GL_ONE_MINUS_SRC_COLOR: $C = 1 - src$

Blending (смешивание)

- Настройка весов C_{src} и C_{dst} :

```
glBlendFunc(GLenum src, GLenum dst):
```

- GL_ZERO: $C = 0$
- GL_ONE: $C = 1$
- GL_SRC_COLOR: $C = src$
- GL_ONE_MINUS_SRC_COLOR: $C = 1 - src$
- GL_SRC_ALPHA: $C = src_A$

Blending (смешивание)

- Настройка весов C_{src} и C_{dst} :

```
glBlendFunc(GLenum src, GLenum dst):
```

- GL_ZERO: $C = 0$
- GL_ONE: $C = 1$
- GL_SRC_COLOR: $C = src$
- GL_ONE_MINUS_SRC_COLOR: $C = 1 - src$
- GL_SRC_ALPHA: $C = src_A$
- GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA: $C = 1 - src_A$
- И т.д.

Blending (смешивание)

- Обычно $src = (R, G, B, A)$ означает, что цвет имеет полупрозрачность (точнее – *непрозрачность*, или *opacity*) равную A
 - $A = 0$ – полностью прозрачный цвет
 - $A = 1$ – полностью непрозрачный цвет

Blending (смешивание)

- Обычно $src = (R, G, B, A)$ означает, что цвет имеет полупрозрачность (точнее – *непрозрачность*, или *opacity*) равную A
 - $A = 0$ – полностью прозрачный цвет
 - $A = 1$ – полностью непрозрачный цвет
- Для этого нужна такая формула смешивания:

$$dst \leftarrow src_A \cdot src + (1 - src_A) \cdot dst = \text{lerp}(dst, src, src_A)$$

Blending (смешивание)

- Обычно $src = (R, G, B, A)$ означает, что цвет имеет полупрозрачность (точнее – *непрозрачность*, или *opacity*) равную A
 - $A = 0$ – полностью прозрачный цвет
 - $A = 1$ – полностью непрозрачный цвет
- Для этого нужна такая формула смешивания:
$$dst \leftarrow src_A \cdot src + (1 - src_A) \cdot dst = \text{lerp}(dst, src, src_A)$$
- Этому соответствует настройка

```
glBlendEquation(GL_FUNC_ADD);
glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA);
```

Blending (смешивание)

- Обычно $src = (R, G, B, A)$ означает, что цвет имеет полупрозрачность (точнее – *непрозрачность*, или *opacity*) равную A
 - $A = 0$ – полностью прозрачный цвет
 - $A = 1$ – полностью непрозрачный цвет
- Для этого нужна такая формула смешивания:
$$dst \leftarrow src_A \cdot src + (1 - src_A) \cdot dst = \text{lerp}(dst, src, src_A)$$
- Этому соответствует настройка

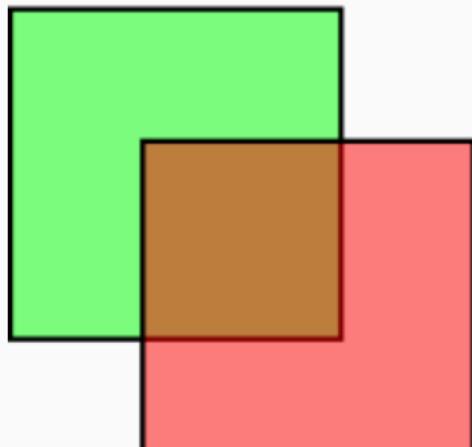
```
glBlendEquation(GL_FUNC_ADD);
glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA);
```

- Это *самый типичный* способ использовать blending

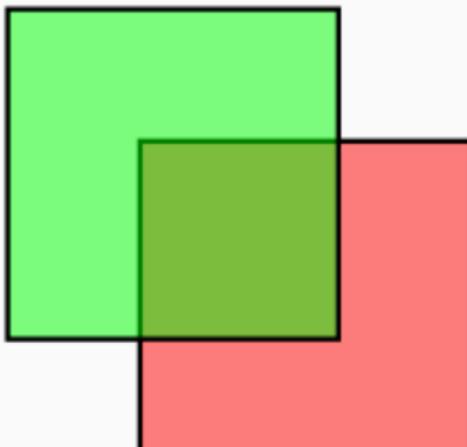
Blending (смешивание)

- Такое смешивание некоммутативно, т.е. результат зависит от порядка рисования
- Бывают конкретные ситуации, когда коммутативность не нарушается (наложение двух объектов с $A = 0.5$ или наложение нескольких объектов одинакового цвета)

Red on top

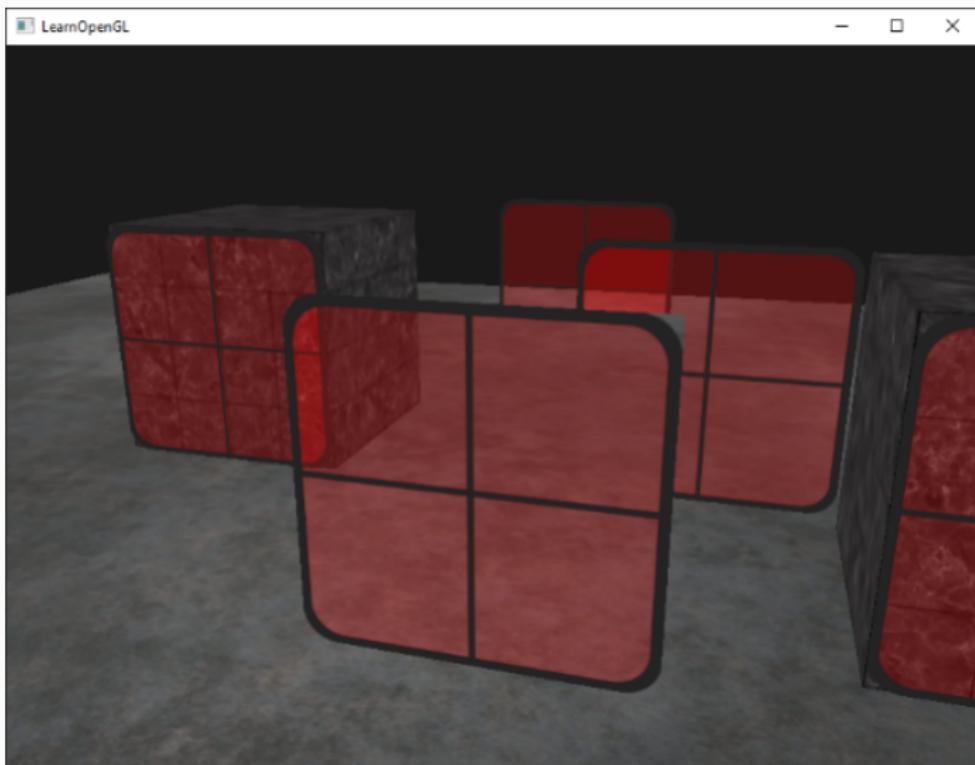


Green on top



Blending (смешивание)

- Смешивание некорректно работает с тестом глубины



Blending (смешивание)

- В общем случае нужно сортировать полупрозрачные объекты и рисовать в порядке уменьшения расстояния до камеры

Blending (смешивание)

- В общем случае нужно сортировать полупрозрачные объекты и рисовать в порядке уменьшения расстояния до камеры
 - Что именно считать расстоянием до камеры (расстояние от центра объекта / от ближайшей вершины / от самой далёкой вершины / среднее между минимальным и максимальным расстоянием) – большой вопрос

Blending (смешивание)

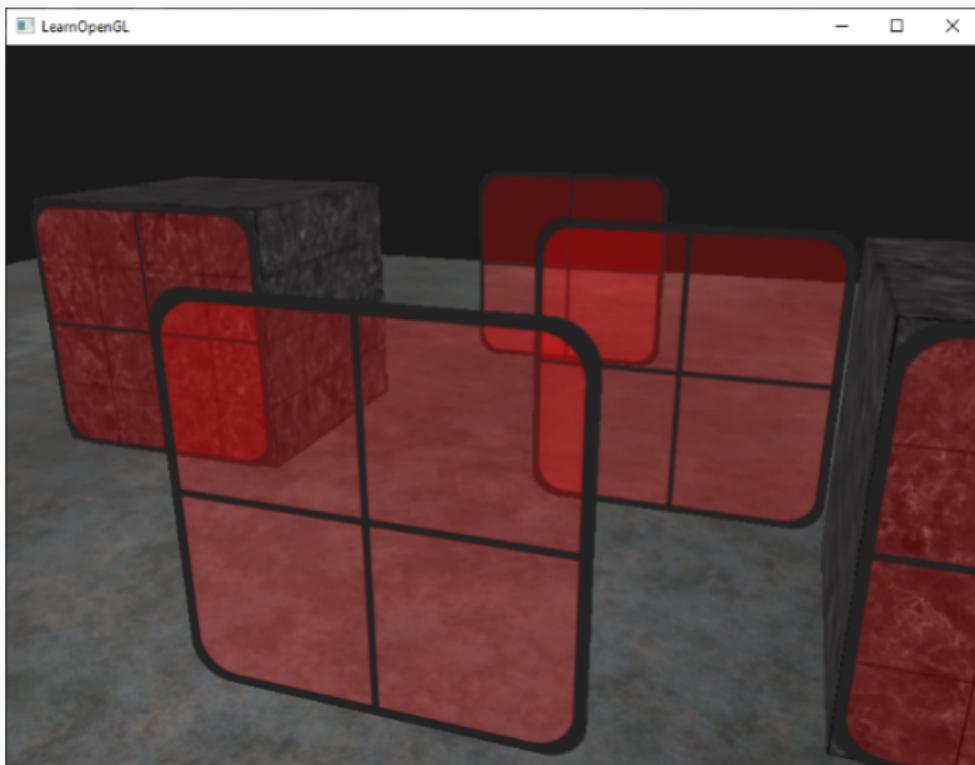
- В общем случае нужно сортировать полупрозрачные объекты и рисовать в порядке уменьшения расстояния до камеры
 - Что именно считать расстоянием до камеры (расстояние от центра объекта / от ближайшей вершины / от самой далёкой вершины / среднее между минимальным и максимальным расстоянием) – большой вопрос
 - Для любого варианта можно найти примеры, ломающие его (цикл между объектами, накрывающими друг друга)

Blending (смешивание)

- В общем случае нужно сортировать полупрозрачные объекты и рисовать в порядке уменьшения расстояния до камеры
 - Что именно считать расстоянием до камеры (расстояние от центра объекта / от ближайшей вершины / от самой далёкой вершины / среднее между минимальным и максимальным расстоянием) – большой вопрос
 - Для любого варианта можно найти примеры, ломающие его (цикл между объектами, накрывающими друг друга)
- Order-independent transparency (OIT) – активная тема исследований

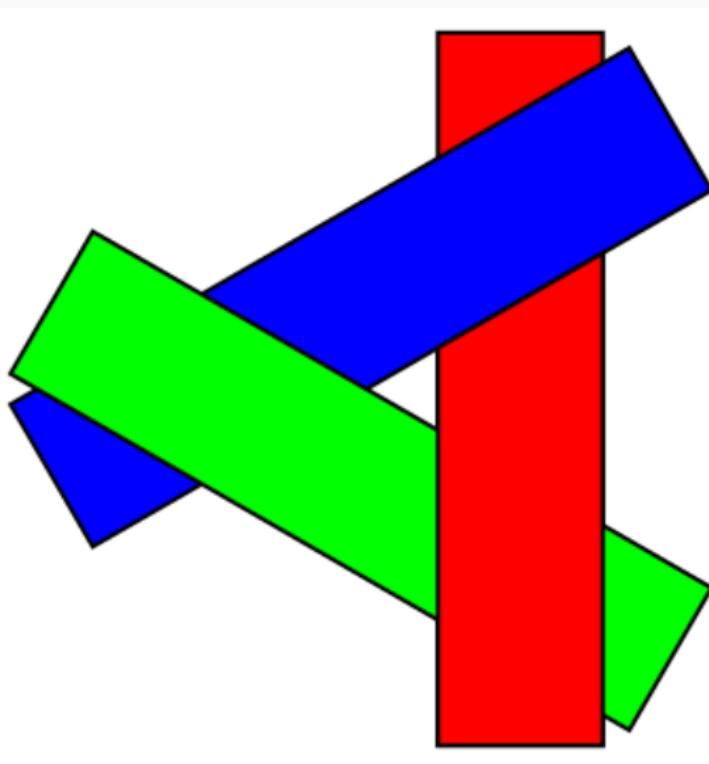
Blending (смешивание)

- Сортировка по расстоянию до камеры



Blending (смешивание)

- Случай, когда сортировка не поможет



Аддитивное смешивание

- Один часто используемый вариант смешивания – аддитивное смешивание
- $dst \leftarrow src + dst$ или $dst \leftarrow src_A \cdot src + dst$

Аддитивное смешивание

- Один часто используемый вариант смешивания – аддитивное смешивание
- $dst \leftarrow src + dst$ или $dst \leftarrow src_A \cdot src + dst$
- `glBlendEquation(GL_FUNC_ADD)`
- `glBlendFunc(GL_ONE, GL_ONE)` или
`glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE)`

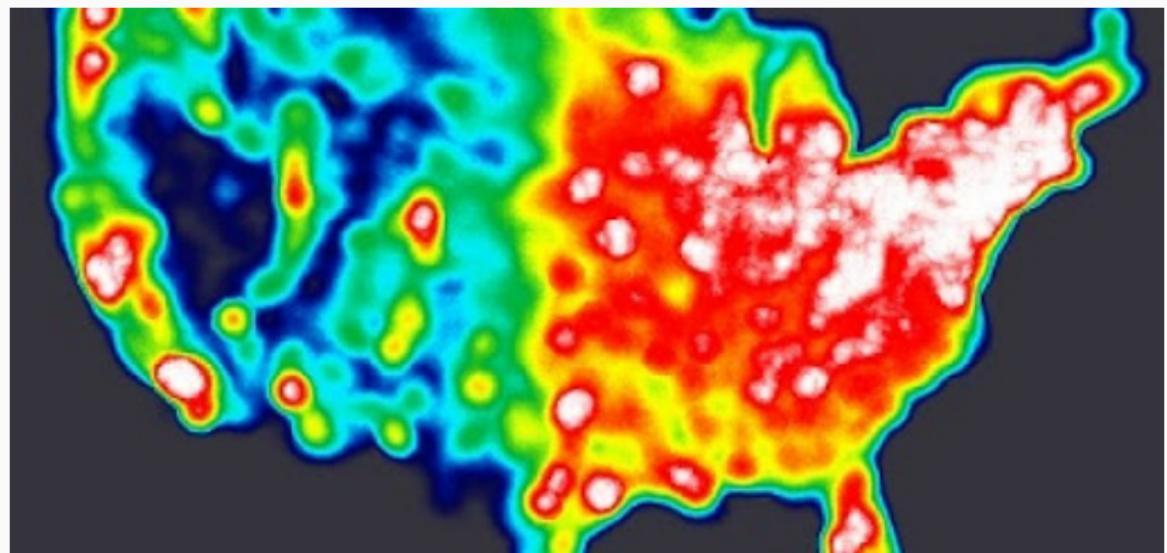
Аддитивное смешивание

- Один часто используемый вариант смешивания – аддитивное смешивание
- $dst \leftarrow src + dst$ или $dst \leftarrow src_A \cdot src + dst$
- `glBlendEquation(GL_FUNC_ADD)`
- `glBlendFunc(GL_ONE, GL_ONE)` или
`glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE)`
- Такое смешивание коммутативно \implies не важно, в каком порядке рисовать объекты

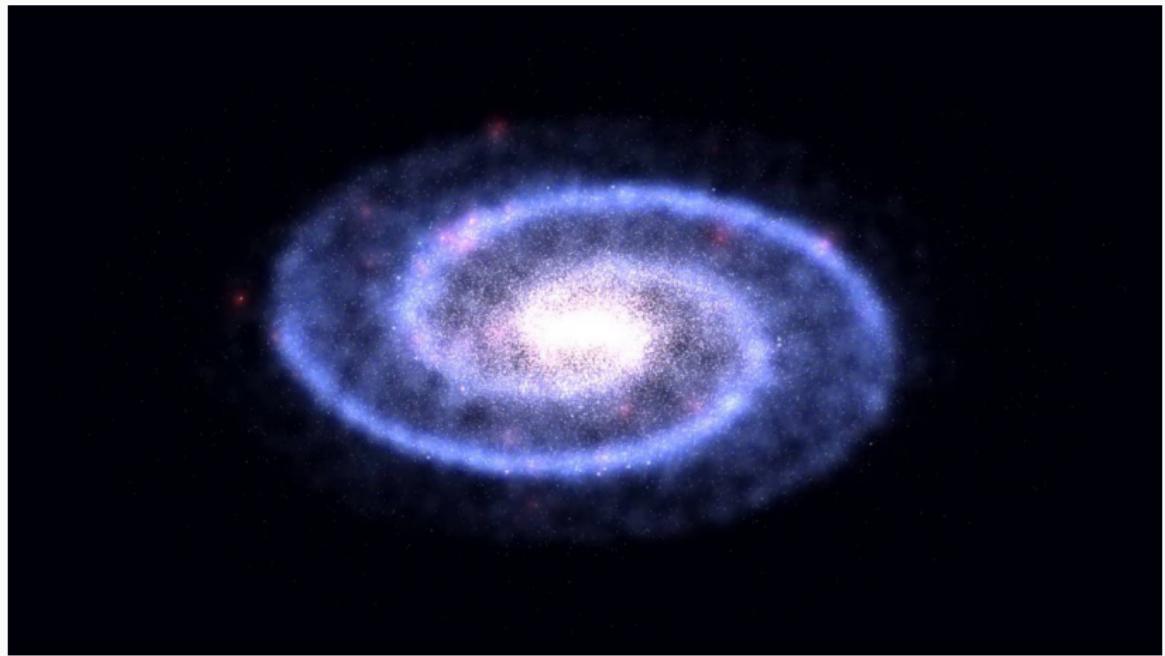
Аддитивное смешивание

- Один часто используемый вариант смешивания – аддитивное смешивание
- $dst \leftarrow src + dst$ или $dst \leftarrow src_A \cdot src + dst$
- `glBlendEquation(GL_FUNC_ADD)`
- `glBlendFunc(GL_ONE, GL_ONE)` или
`glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE)`
- Такое смешивание коммутативно \implies не важно, в каком порядке рисовать объекты
- Heatmaps, облака точек

Аддитивное смешивание



Аддитивное смешивание



Blending (смешивание)

- khronos.org/opengl/wiki/Blending
- opengl-tutorial.org/intermediate-tutorials/tutorial-10-transparency
- learnopengl.com/Advanced-OpenGL/Blending

Stencil buffer (буфер трафарета)

- Особый буфер, хранящий произвольные данные (почти всегда unsigned 8-bit на каждый пиксель), с особыми побитовыми операциями над ними

Stencil buffer (буфер трафарета)

- Особый буфер, хранящий произвольные данные (почти всегда unsigned 8-bit на каждый пиксель), с особыми побитовыми операциями над ними
- Чем-то аналогичен буферу глубины: тоже хранит какие-то данные, такого же размера (как и цветовой буфер), тоже позволяет рисовать или не рисовать пиксель по какому-то условию (stencil test – происходит перед depth test'ом)

Stencil buffer (буфер трафарета)

- Особый буфер, хранящий произвольные данные (почти всегда unsigned 8-bit на каждый пиксель), с особыми побитовыми операциями над ними
- Чем-то аналогичен буферу глубины: тоже хранит какие-то данные, такого же размера (как и цветовой буфер), тоже позволяет рисовать или не рисовать пиксель по какому-то условию (stencil test – происходит перед depth test'ом)
- У дефолтного фреймбуфера часто есть свой stencil буфер (зависит от настроек контекста OpenGL)

Stencil buffer (буфер трафарета)

- Особый буфер, хранящий произвольные данные (почти всегда unsigned 8-bit на каждый пиксель), с особыми побитовыми операциями над ними
- Чем-то аналогичен буферу глубины: тоже хранит какие-то данные, такого же размера (как и цветовой буфер), тоже позволяет рисовать или не рисовать пиксель по какому-то условию (stencil test – происходит перед depth test'ом)
- У дефолтного фреймбуфера часто есть свой stencil буфер (зависит от настроек контекста OpenGL)
- Можно (и нужно, если вы его используете) очищать как `glClear(GL_STENCIL_BUFFER_BIT)`

Stencil buffer (буфер трафарета)

- Особый буфер, хранящий произвольные данные (почти всегда unsigned 8-bit на каждый пиксель), с особыми побитовыми операциями над ними
- Чем-то аналогичен буферу глубины: тоже хранит какие-то данные, такого же размера (как и цветовой буфер), тоже позволяет рисовать или не рисовать пиксель по какому-то условию (stencil test – происходит перед depth test'ом)
- У дефолтного фреймбуфера часто есть свой stencil буфер (зависит от настроек контекста OpenGL)
- Можно (и нужно, если вы его используете) очищать как `glClear(GL_STENCIL_BUFFER_BIT)`
- Настроить значение, которым очищается буфер:
`glClearStencil`

Stencil тест

- Включить/выключить stencil тест:
`glEnable/glDisable(GL_STENCIL_TEST)`

Stencil тест

- Включить/выключить stencil тест:
`glEnable/glDisable(GL_STENCIL_TEST)`
- Настроить stencil тест: `glStencilFunc(func, ref, mask)`
 - func – одна из констант GL_ALWAYS, GL_LESS, ...
 - ref – референсное значение для теста
 - mask – побитовая маска для теста
- Stencil тест: `func(ref & mask, stencil & mask)`

Stencil тест

- Включить/выключить stencil тест:
`glEnable/glDisable(GL_STENCIL_TEST)`
- Настроить stencil тест: `glStencilFunc(func, ref, mask)`
 - func – одна из констант `GL_ALWAYS`, `GL_LESS`, ...
 - ref – референсное значение для теста
 - mask – побитовая маска для теста
- Stencil тест: `func(ref & mask, stencil & mask)`
- Так же, как с depth тестом: если stencil тест не прошёл, пиксель не будет нарисован

Stencil тест

- Как записать значение в stencil буфер?

Stencil тест

- Как записать значение в stencil буфер?
`glStencilOp(sfail, dpfail, dppass)`

Stencil тест

- Как записать значение в stencil буфер?
`glStencilOp(sfail, dpfail, dppass)`
 - `sfail` – что делать, если пиксель не прошёл stencil тест
 - `dpfail` – что делать, если пиксель прошёл stencil тест, но не прошёл depth тест
 - `dppass` – что делать, если пиксель прошёл оба теста

Stencil тест

- Возможные значение `sfail`, `dppfail` И `dppass`:
 - `GL_KEEP` – не менять записанное значение
 - `GL_ZERO` – записать 0
 - `GL_INVERT` – побитово обратить
 - `GL_REPLACE` – записать `ref` из функции `glStencilFunc`
 - `GL_INCR` – увеличить на 1, если значение меньше максимального
 - `GL_DECR` – уменьшить на 1, если значение больше минимального (0)
 - `GL_INCR_WRAP` – увеличить на 1 с целочисленным переполнением
 - `GL_DECR_WRAP` – уменьшить на 1 с целочисленным переполнением

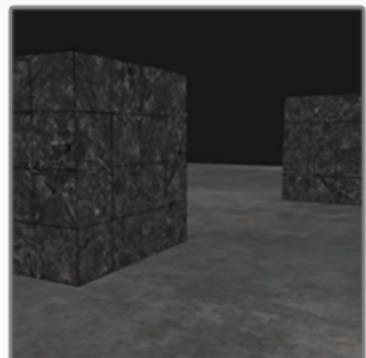
Stencil тест

- Дополнительно можно включать/выключать запись отдельных битов stencil буфера: `glStencilMask`

Stencil тест

- Дополнительно можно включать/выключать запись отдельных битов stencil буфера: `glStencilMask`
- Все параметры stencil теста можно настраивать отдельно для front и back граней функциями `glStencilFuncSeparate`, `glStencilOpSeparate`, `glStencilMaskSeparate`

Stencil test



Color buffer

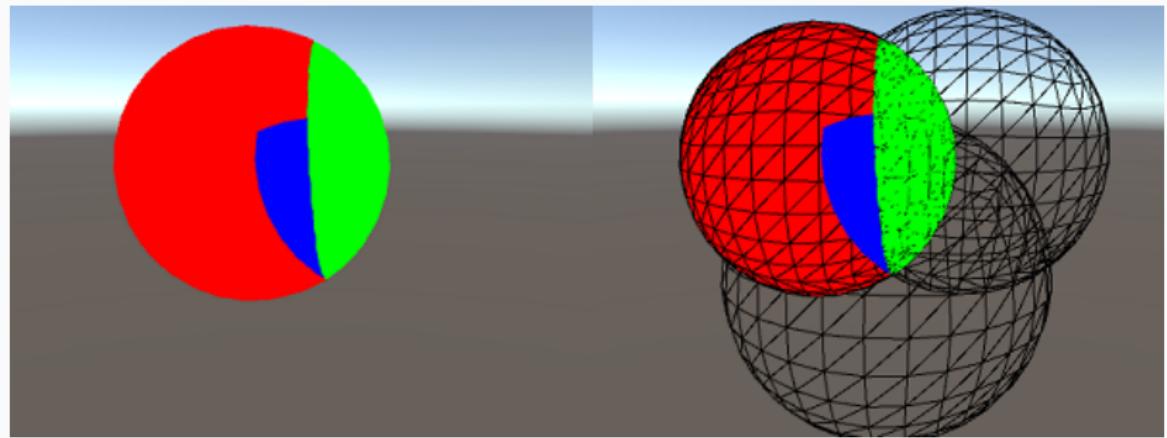
| |
|----------------------|
| 00000000000000000000 |
| 00000000000000000000 |
| 00000000000000000000 |
| 00000000000000000000 |
| 00000000000000000000 |
| 00000000000000000000 |
| 00000000000000000000 |
| 01111111110000000000 |
| 01111111110000000000 |
| 01100001100000000000 |
| 01100001100000000000 |
| 01111111110000000000 |
| 01111111110000000000 |
| 00000000000000000000 |

Stencil buffer



After stencil test

Stencil тест



Stencil тест

Always pass, value is unused
`glStencilFunc(GL_ALWAYS, 0, 0xFF);`
Unused(never fails), increment on pass, increment on z-fail
`glStencilOp(GL_KEEP, GL_INCR, GL_INCR);`
Draw 3 quads on top of each other

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Pass only when stencil value is >=2
`glStencilFunc(GL_GEQUAL, 2, 0xFF);`
Don't modify (or do?)
`glStencilOp(GL_KEEP, GL_KEEP, GL_KEEP);`
Draw a fullscreen quad (only bright pixels are shaded)

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Stencil буфер: применение

- Некоторые алгоритмы рисования теней (shadow volumes)

Shadow volumes (stencil shadows)



Stencil буфер: применение

- Некоторые алгоритмы рисования теней (shadow volumes)

Stencil буфер: применение

- Некоторые алгоритмы рисования теней (shadow volumes)
- Любая ситуация, в которой нужно ограничить рисование определённых пикселей:

Stencil буфер: применение

- Некоторые алгоритмы рисования теней (shadow volumes)
- Любая ситуация, в которой нужно ограничить рисование определённых пикселей:
 - Симулятор самолёта: сначала рисуется внутренность самолёта, затем – окружающий мир, только там, где не был нарисован самолёт \Rightarrow можно избежать проблем с точностью буфера глубины

Microsoft flight simulator



Stencil буфер: применение

- Некоторые алгоритмы рисования теней (shadow volumes)
- Любая ситуация, в которой нужно ограничить рисование определённых пикселей:
 - Симулятор самолёта: сначала рисуется внутренность самолёта, затем – окружающий мир, только там, где не был нарисован самолёт \Rightarrow можно избежать проблем с точностью буфера глубины

Stencil буфер: применение

- Некоторые алгоритмы рисования теней (shadow volumes)
- Любая ситуация, в которой нужно ограничить рисование определённых пикселей:
 - Симулятор самолёта: сначала рисуется внутренность самолёта, затем – окружающий мир, только там, где не был нарисован самолёт \Rightarrow можно избежать проблем с точностью буфера глубины
 - UI, который нужно нарисовать в какой-то ограниченной области экрана (например, scroll)

ScrollView

A Scroll Rect is usually used to scroll a large image or panel of



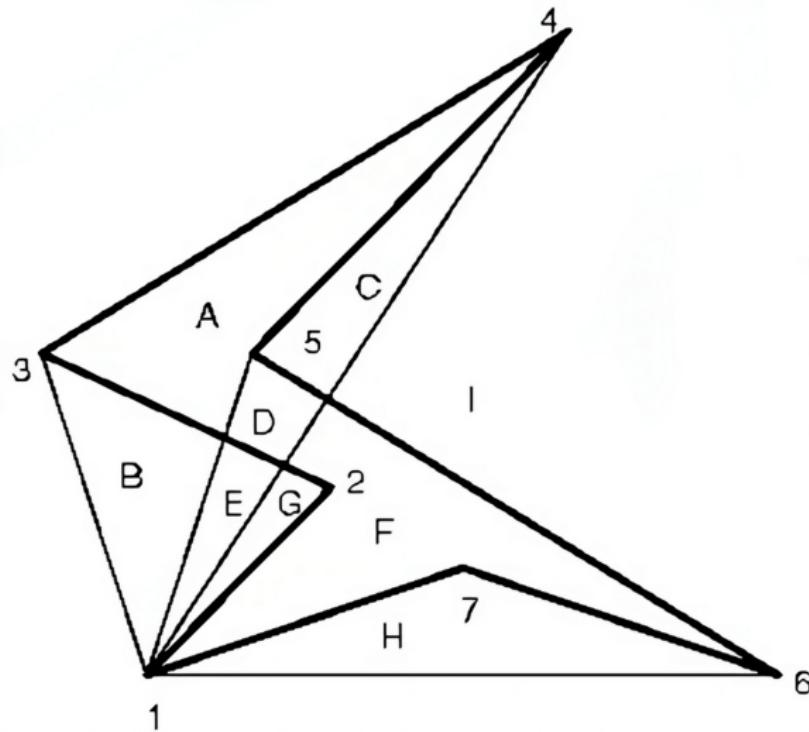
Stencil буфер: применение

- Некоторые алгоритмы рисования теней (shadow volumes)
- Любая ситуация, в которой нужно ограничить рисование определённых пикселей:
 - Симулятор самолёта: сначала рисуется внутренность самолёта, затем – окружающий мир, только там, где не был нарисован самолёт \Rightarrow можно избежать проблем с точностью буфера глубины
 - UI, который нужно нарисовать в какой-то ограниченной области экрана (например, scroll)

Stencil буфер: применение

- Некоторые алгоритмы рисования теней (shadow volumes)
- Любая ситуация, в которой нужно ограничить рисование определённых пикселей:
 - Симулятор самолёта: сначала рисуется внутренность самолёта, затем – окружающий мир, только там, где не был нарисован самолёт \Rightarrow можно избежать проблем с точностью буфера глубины
 - UI, который нужно нарисовать в какой-то ограниченной области экрана (например, scroll)
 - Рисование невыпуклых полигонов (odd-even rule)

Невыпуклый полигон



- *A: 134
- B: 123 134
- C: 134 145
- *D: 134 145 156
- E: 123 134 145 156
- *F: 156
- G: 123 156
- H: 156 167
- I: (none)

Stencil буфер: ссылки

- khronos.org/opengl/wiki/Stencil_Test
- learnopengl.com/Advanced-OpenGL/Stencil-testing
- open.gl/depthstencils
- en.wikibooks.org/wiki/OpenGL_Programming/Stencil_buffer

Framebuffer (FBO, кадровый буфер)

- OpenGL-объект, хранящий настройки того, куда осуществляется рисование

Framebuffer (FBO, кадровый буфер)

- OpenGL-объект, хранящий настройки того, куда осуществляется рисование
- Не владеет памятью, только ссылается на неё

Framebuffer (FBO, кадровый буфер)

- OpenGL-объект, хранящий настройки того, куда осуществляется рисование
- **Не владеет** памятью, только ссылается на неё
- Может иметь свой depth buffer, stencil buffer, и несколько color buffer'ов

Framebuffer (FBO, кадровый буфер)

- OpenGL-объект, хранящий настройки того, куда осуществляется рисование
- **Не владеет** памятью, только ссылается на неё
- Может иметь свой depth buffer, stencil buffer, и несколько color buffer'ов
- Общепринятая аббревиатура: FBO

Framebuffer

- Создание/удаление: `glGenFramebuffers`/`glDeleteFramebuffers`

Framebuffer

- Создание/удаление: `glGenFramebuffers`/`glDeleteFramebuffers`
- Сделать текущим: `glBindFramebuffer`

Framebuffer

- Создание/удаление: `glGenFramebuffers`/`glDeleteFramebuffers`
- Сделать текущим: `glBindFramebuffer`
- Два значения target:
 - `GL_DRAW_FRAMEBUFFER` – в этот фреймбуфер рисуют все операции рисования (`glDrawArrays`, etc), этот фреймбуфер очищает `glClear`

Framebuffer

- Создание/удаление: `glGenFramebuffers`/`glDeleteFramebuffers`
- Сделать текущим: `glBindFramebuffer`
- Два значения target:
 - `GL_DRAW_FRAMEBUFFER` – в этот фреймбуфер рисуют все операции рисования (`glDrawArrays`, etc), этот фреймбуфер очищает `glClear`
 - `GL_READ_FRAMEBUFFER` – из этого фреймбуфера читают операции чтения

Framebuffer

- Создание/удаление: `glGenFramebuffers`/`glDeleteFramebuffers`
- Сделать текущим: `glBindFramebuffer`
- Два значения target:
 - `GL_DRAW_FRAMEBUFFER` – в этот фреймбуфер рисуют все операции рисования (`glDrawArrays`, etc), этот фреймбуфер очищает `glClear`
 - `GL_READ_FRAMEBUFFER` – из этого фреймбуфера читают операции чтения
- Значение target `GL_FRAMEBUFFER` иногда ведёт себя как `GL_DRAW_FRAMEBUFFER`, а иногда – как `DRAW+READ`
- Советую *не использовать* `GL_FRAMEBUFFER`

Default framebuffer

- Default framebuffer – особый объект, имеет ID = 0

Default framebuffer

- Default framebuffer – особый объект, имеет ID = 0
- Создаётся при создании OpenGL-контекста

Default framebuffer

- Default framebuffer – особый объект, имеет ID = 0
- Создаётся при создании OpenGL-контекста
- Настроен, чтобы рисовать на экран, к которому привязан контекст

Default framebuffer

- Default framebuffer – особый объект, имеет ID = 0
- Создаётся при создании OpenGL-контекста
- Настроен, чтобы рисовать на экран, к которому привязан контекст
- Для него форматы цвета, буфера глубины и stencil буфера настраиваются при создании контекста

Default framebuffer

- Default framebuffer – особый объект, имеет ID = 0
- Создаётся при создании OpenGL-контекста
- Настроен, чтобы рисовать на экран, к которому привязан контекст
- Для него форматы цвета, буфера глубины и stencil буфера настраиваются при создании контекста
- Нельзя настроить по-другому или удалить

Запись во фреймбуфер

- Напрямую писать во фреймбуфер нельзя!

Запись во фреймбуфер

- Напрямую писать во фреймбуфер нельзя!
- Можно скопировать пиксели из одного фреймбуфера в другой

Запись во фреймбуфер

- Напрямую писать во фреймбуфер нельзя!
- Можно скопировать пиксели из одного фреймбуфера в другой
- Можно рисовать с помощью фреймбуфера в текстуру

Запись во фреймбуфер

- Напрямую писать во фреймбуфер нельзя!
- Можно скопировать пиксели из одного фреймбуфера в другой
- Можно рисовать с помощью фреймбуфера в текстуру
- Все операции рисования `glDraw*` рисуют в текущий `GL_DRAW_FRAMEBUFFER`

Запись во фреймбуфер

- Напрямую писать во фреймбуфер нельзя!
- Можно скопировать пиксели из одного фреймбуфера в другой
- Можно рисовать с помощью фреймбуфера в текстуру
- Все операции рисования `glDraw*` рисуют в текущий `GL_DRAW_FRAMEBUFFER`
- Приём рисования в текстуру называется *render to texture*

Чтение из фреймбуфера

- `glReadPixels` – копирует на CPU пиксели из определённого участка текущего `GL_READ_FRAMEBUFFER` (можно прочитать цвет, глубину или stencil)

Чтение из фреймбуфера

- `glReadPixels` – копирует на CPU пиксели из определённого участка текущего `GL_READ_FRAMEBUFFER` (можно прочитать цвет, глубину или stencil)
- `glBlitFramebuffer` – копирует пиксели из определённого участка текущего `GL_READ_FRAMEBUFFER` в определённый участок текущего `GL_DRAW_FRAMEBUFFER` (можно скопировать цвет, глубину или stencil)

Чтение из фреймбуфера

- `glReadPixels` – копирует на CPU пиксели из определённого участка текущего `GL_READ_FRAMEBUFFER` (можно прочитать цвет, глубину или stencil)
- `glBlitFramebuffer` – копирует пиксели из определённого участка текущего `GL_READ_FRAMEBUFFER` в определённый участок текущего `GL_DRAW_FRAMEBUFFER` (можно скопировать цвет, глубину или stencil)
- `glReadBuffer` – настроить, из какого *attachment*'а текущего `GL_READ_FRAMEBUFFER` мы хотим читать

Framebuffer attachments

- Текстура, на которую ссылается фреймбуфер, называется *attachment*

Framebuffer attachments

- Текстура, на которую ссылается фреймбуфер, называется *attachment*
- У каждого фреймбуфера есть набор *attachment points*

Framebuffer attachments

- Текстура, на которую ссылается фреймбуфер, называется *attachment*
- У каждого фреймбуфера есть набор *attachment points*
- `GL_COLOR_ATTACHMENT0`, ... `GL_COLOR_ATTACHMENT7` – цветовые буферы

Framebuffer attachments

- Текстура, на которую ссылается фреймбуфер, называется *attachment*
- У каждого фреймбуфера есть набор *attachment points*
- `GL_COLOR_ATTACHMENT0`, ... `GL_COLOR_ATTACHMENT7` – цветовые буфера
 - Максимальное количество: `glGet(GL_MAX_COLOR_ATTACHMENTS)`

Framebuffer attachments

- Текстура, на которую ссылается фреймбуфер, называется *attachment*
- У каждого фреймбуфера есть набор *attachment points*
- `GL_COLOR_ATTACHMENT0`, ... `GL_COLOR_ATTACHMENT7` – цветовые буферы
 - Максимальное количество: `glGet(GL_MAX_COLOR_ATTACHMENTS)`
- `GL_DEPTH_ATTACHMENT` – буфер глубины
- `GL_STENCIL_ATTACHMENT` – stencil буфер
- `GL_DEPTH_STENCIL_ATTACHMENT` – буфер глубины + stencil буфер в одной текстуре

Framebuffer attachments

- Связать текстуру с фреймбуфером:

```
glFramebufferTexture(target, attachment, texture, level)
```

Framebuffer attachments

- Связать текстуру с фреймбуфером:

```
glFramebufferTexture(target, attachment, texture, level)
```

- target – таргет фреймбуфера (`GL_READ_FRAMEBUFFER` или `GL_DRAW_FRAMEBUFFER`)

Framebuffer attachments

- Связать текстуру с фреймбуфером:

```
glFramebufferTexture(target, attachment, texture, level)
```

- target – таргет фреймбуфера (`GL_READ_FRAMEBUFFER` или `GL_DRAW_FRAMEBUFFER`)
- attachment – `GL_COLOR_ATTACHMENT0`, ...

Framebuffer attachments

- Связать текстуру с фреймбуфером:

```
glFramebufferTexture(target, attachment, texture, level)
```

- target – таргет фреймбуфера (`GL_READ_FRAMEBUFFER` или `GL_DRAW_FRAMEBUFFER`)
- attachment – `GL_COLOR_ATTACHMENT0`, ...
- texture – ID текстуры (делать саму текстуру текущей *не нужно!*)

Framebuffer attachments

- Связать текстуру с фреймбуфером:

```
glFramebufferTexture(target, attachment, texture, level)
```

- target – таргет фреймбуфера (`GL_READ_FRAMEBUFFER` или `GL_DRAW_FRAMEBUFFER`)
- attachment – `GL_COLOR_ATTACHMENT0`, ...
- texture – ID текстуры (делать саму текстуру текущей *не нужно!*)
- level – mipmap-уровень текстуры, в который будет осуществляться рисование (обычно 0)

Framebuffer attachments

- Можно привязать несколько текстур к одному фреймбуферу (в т.ч. иметь несколько цветовых буферов – соответственно, несколько `out`-переменных во фрагментном шейдере)

Framebuffer attachments

- Можно привязать несколько текстур к одному фреймбуферу (в т.ч. иметь несколько цветовых буферов – соответственно, несколько `out`-переменных во фрагментном шейдере)
- Можно привязать одну текстуру к нескольким фреймбуферам

Framebuffer attachments

- Можно привязать несколько текстур к одному фреймбуферу (в т.ч. иметь несколько цветовых буферов – соответственно, несколько `out`-переменных во фрагментном шейдере)
- Можно привязать одну текстуру к нескольким фреймбуферам
- Можно привязать несколько разных тіртар-уровней одной текстуры к одному или нескольким фреймбуферам

Framebuffer attachments

- Можно привязать несколько текстур к одному фреймбуферу (в т.ч. иметь несколько цветовых буферов – соответственно, несколько `out`-переменных во фрагментном шейдере)
- Можно привязать одну текстуру к нескольким фреймбуферам
- Можно привязать несколько разных тіртар-уровней одной текстуры к одному или нескольким фреймбуферам
- Можно привязать одномерные и двумерные текстуры, грани cubemap-текстуры (`glFramebufferTexture2D`), слои трёхмерных или 2D-array текстур (`glFramebufferTexture3D` или `glFramebufferTextureLayer`)

Framebuffer completeness

- У фреймбуферов есть особое свойство – *completeness*: правильно ли настроен фреймбуфер

Framebuffer completeness

- У фреймбуферов есть особое свойство – *completeness*: правильно ли настроен фреймбуфер
- В частности, чтобы фреймбуфер был *complete*, нужно, чтобы все attachment'ы имели *правильный формат*

Framebuffer completeness

- У фреймбуферов есть особое свойство – *completeness*: правильно ли настроен фреймбуфер
- В частности, чтобы фреймбуфер был *complete*, нужно, чтобы все attachment'ы имели *правильный формат*
- Проверить completeness – `glCheckFramebufferStatus`: вернёт `GL_FRAMEBUFFER_COMPLETE` или некий код ошибки

Framebuffer completeness

- У фреймбуферов есть особое свойство – *completeness*: правильно ли настроен фреймбуфер
- В частности, чтобы фреймбуфер был *complete*, нужно, чтобы все attachment'ы имели *правильный формат*
- Проверить completeness – `glCheckFramebufferStatus`: вернёт `GL_FRAMEBUFFER_COMPLETE` или некий код ошибки
- Рисовать в incomplete фреймбуфер – ошибка

Renderable formats

- Что такое *правильный формат?*

Renderable formats

- Что такое *правильный формат?*
- Для цветового буфера – *color-renderable* формат, т.е. любой цветовой формат: GL_RED, GL_RGB8, GL_RGBA8, GL_RG32F, ...

Renderable formats

- Что такое *правильный формат*?
- Для цветового буфера – *color-renderable* формат, т.е. любой цветовой формат: GL_RED, GL_RGB8, GL_RGBA8, GL_RG32F, ...
- Для буфера глубины – *depth-renderable* формат:
GL_DEPTH_COMPONENT16, GL_DEPTH_COMPONENT24,
GL_DEPTH_COMPONENT32F, GL_DEPTH24_STENCIL8,
GL_DEPTH32F_STENCIL8

Renderable formats

- Что такое *правильный формат*?
- Для цветового буфера – *color-renderable* формат, т.е. любой цветовой формат: GL_RED, GL_RGB8, GL_RGBA8, GL_RG32F, ...
- Для буфера глубины – *depth-renderable* формат:
GL_DEPTH_COMPONENT16, GL_DEPTH_COMPONENT24,
GL_DEPTH_COMPONENT32F, GL_DEPTH24_STENCIL8,
GL_DEPTH32F_STENCIL8
- Для stencil буфера – *stencil-renderable* формат:
GL_DEPTH24_STENCIL8, GL_DEPTH32F_STENCIL8

Renderable formats

- Что такое *правильный формат*?
- Для цветового буфера – *color-renderable* формат, т.е. любой цветовой формат: GL_RED, GL_RGB8, GL_RGBA8, GL_RG32F, ...
- Для буфера глубины – *depth-renderable* формат:
GL_DEPTH_COMPONENT16, GL_DEPTH_COMPONENT24,
GL_DEPTH_COMPONENT32F, GL_DEPTH24_STENCIL8,
GL_DEPTH32F_STENCIL8
- Для stencil буфера – *stencil-renderable* формат:
GL_DEPTH24_STENCIL8, GL_DEPTH32F_STENCIL8
- Некоторые форматы могут *не поддерживаться* конкретными драйверами/GPU

Renderable formats

- Что такое *правильный формат*?
- Для цветового буфера – *color-renderable* формат, т.е. любой цветовой формат: GL_RED, GL_RGB8, GL_RGBA8, GL_RG32F, ...
- Для буфера глубины – *depth-renderable* формат:
GL_DEPTH_COMPONENT16, GL_DEPTH_COMPONENT24,
GL_DEPTH_COMPONENT32F, GL_DEPTH24_STENCIL8,
GL_DEPTH32F_STENCIL8
- Для stencil буфера – *stencil-renderable* формат:
GL_DEPTH24_STENCIL8, GL_DEPTH32F_STENCIL8
- Некоторые форматы могут *не поддерживаться* конкретными драйверами/GPU
- Есть небольшой список гарантированно поддерживаемых форматов (см. документацию)

Рисование во фреймбуфер

- Все операции рисования `glDraw*` рисуют в текущий `GL_DRAW_FRAMEBUFFER`

Рисование во фреймбуфер

- Все операции рисования `glDraw*` рисуют в текущий `GL_DRAW_FRAMEBUFFER`
- Как связать attachments фреймбуфера с `out`-переменными фрагментного шейдера?

Рисование во фреймбуфер

- Все операции рисования `glDraw*` рисуют в текущий `GL_DRAW_FRAMEBUFFER`
- Как связать attachments фреймбуфера с `out`-переменными фрагментного шейдера?
- `glDrawBuffers(n, buffers)`
 - `buffers` – массив констант `GL_COLOR_ATTACHMENTi` или специальных значений для default фреймбуфера
 - `layout (location = k) out ...` будет писать в attachment, указанный в `buffers[k]`

Рисование во фреймбуфер

- Все операции рисования `glDraw*` рисуют в текущий `GL_DRAW_FRAMEBUFFER`
- Как связать attachments фреймбуфера с `out`-переменными фрагментного шейдера?
- `glDrawBuffers(n, buffers)`
 - `buffers` – массив констант `GL_COLOR_ATTACHMENTi` или специальных значений для default фреймбуфера
 - `layout (location = k) out ...` будет писать в attachment, указанный в `buffers[k]`
- Эта настройка запоминается в самом фреймбуфере, её лучше делать один раз при создании фреймбуфера

Рисование во фреймбуфер

- Все операции рисования `glDraw*` рисуют в текущий `GL_DRAW_FRAMEBUFFER`
- Как связать attachments фреймбуфера с `out`-переменными фрагментного шейдера?
- `glDrawBuffers(n, buffers)`
 - `buffers` – массив констант `GL_COLOR_ATTACHMENTi` или специальных значений для default фреймбуфера
 - `layout (location = k) out ...` будет писать в attachment, указанный в `buffers[k]`
- Эта настройка запоминается в самом фреймбуфере, её лучше делать один раз при создании фреймбуфера
- Есть устаревшая функция `glDrawBuffer` – ей лучше не пользоваться

Viewport

- `glViewport` глобально настраивает преобразование из координат $[-1, 1]^2$ в пиксельные координаты

Viewport

- `glViewport` глобально настраивает преобразование из координат $[-1, 1]^2$ в пиксельные координаты
- Viewport никак не связан с фреймбуфером

Viewport

- `glViewport` глобально настраивает преобразование из координат $[-1, 1]^2$ в пиксельные координаты
- Viewport никак не связан с фреймбуфером
- Но обычно мы хотим, чтобы viewport совпадал с размером текущего фреймбуфера (он может не совпадать с размером экрана)

Viewport

- `glViewport` глобально настраивает преобразование из координат $[-1, 1]^2$ в пиксельные координаты
- Viewport никак не связан с фреймбуфером
- Но обычно мы хотим, чтобы viewport совпадал с размером текущего фреймбуфера (он может не совпадать с размером экрана)
- \Rightarrow После каждого изменения текущего фреймбуфера полезно подумать о viewport'e

Viewport

- *glViewport* глобально настраивает преобразование из координат $[-1, 1]^2$ в пиксельные координаты
- Viewport никак не связан с фреймбуфером
- Но обычно мы хотим, чтобы viewport совпадал с размером текущего фреймбуфера (он может не совпадать с размером экрана)
- \Rightarrow После каждого изменения текущего фреймбуфера полезно подумать о viewport'e
- N.B. *glClear* игнорирует viewport и очищает весь фреймбуфер

Рисование в текстуру: инициализация

```
GLuint fbo;
glGenFramebuffers(1, &fbo);

// создаём текстуру
...

// привязываем текстуру
glBindFramebuffer(GL_DRAW_FRAMEBUFFER, fbo);
glFramebufferTexture(GL_DRAW_FRAMEBUFFER,
    GL_COLOR_ATTACHMENT0,
    fbo_color_texture, 0);

// проверяем completeness
if (glCheckFramebufferStatus(GL_DRAW_FRAMEBUFFER)
    != GL_FRAMEBUFFER_COMPLETE)
    throw std::runtime_error("Framebuffer incomplete");
```

Рисование в текстуру: рендеринг

```
// Рисование в FBO
glBindFramebuffer(GL_DRAW_FRAMEBUFFER, fbo);
GLenum draw_buffers[] = {GL_COLOR_ATTACHMENT0};
glDrawBuffers(1, draw_buffers);
glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
glViewport(0, 0, fbo_width, fbo_height);
drawSomething();

...
// Рисование в дефолтный фреймбуфер
// здесь можно использовать текстуру fbo_color_texture
glBindFramebuffer(GL_DRAW_FRAMEBUFFER, 0);
GLenum draw_buffers[] = {GL_FRONT_LEFT};
glDrawBuffers(1, draw_buffers);
glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
glViewport(0, 0, screen_width, screen_height);
drawSomethingElseUsing(fbo_color_texture);
```

Renderbuffers

- Объекты OpenGL, хранящие пиксели

Renderbuffers

- Объекты OpenGL, хранящие пиксели
- Нельзя загрузить данные, нет режимов фильтрации, нет mipmaps \Rightarrow могут быть быстрее текстур, и работать с ними проще

Renderbuffers

- Объекты OpenGL, хранящие пиксели
- Нельзя загрузить данные, нет режимов фильтрации, нет mipmaps \Rightarrow могут быть быстрее текстур, и работать с ними проще
- Могут быть attachment'ами для фреймбуфера, вместо текстур

Renderbuffers

- Создать/удалить: `glGenRenderbuffers`/`glDeleteRenderbuffers`

Renderbuffers

- Создать/удалить: `glGenRenderbuffers`/`glDeleteRenderbuffers`
- Сделать текущим: `glBindRenderbuffer`, `target = GL_RENDERBUFFER`

Renderbuffers

- Создать/удалить: `glGenRenderbuffers`/`glDeleteRenderbuffers`
- Сделать текущим: `glBindRenderbuffer`, `target = GL_RENDERBUFFER`
- Выделить память: `glRenderbufferStorage`

Renderbuffers

- Создать/удалить: `glGenRenderbuffers`/`glDeleteRenderbuffers`
- Сделать текущим: `glBindRenderbuffer`, `target = GL_RENDERBUFFER`
- Выделить память: `glRenderbufferStorage`
- Привязать renderbuffer к фреймбуферу:
`glFramebufferRenderbuffer`

Framebuffers & renderbuffers: ссылки

- www.khronos.org/opengl/wiki/Framebuffer_Object
- www.khronos.org/opengl/wiki/Renderbuffer_Object
- opengl-tutorial.org/intermediate-tutorials/tutorial-14-render-to-texture
- learnopengl.com/Advanced-OpenGL/Framebuffers

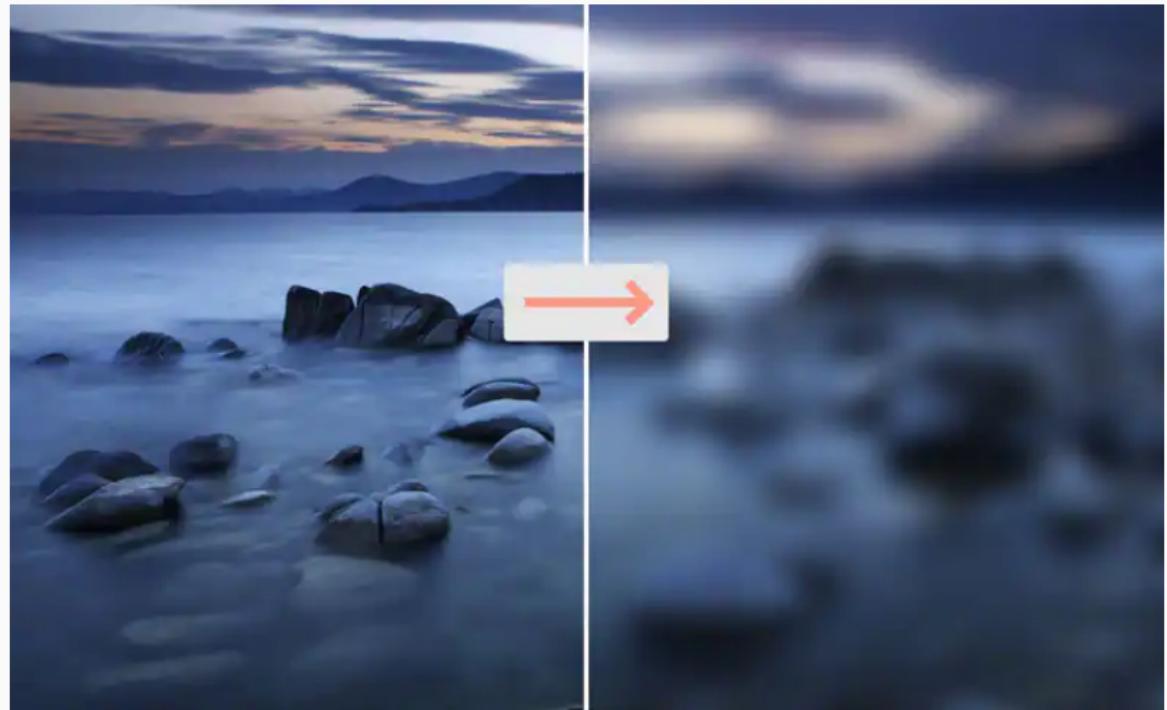
Примеры использования render to texture

- Пост-обработка кадра – реализуется рисованием кадра в текстуру, и затем рисованием полноэкранного прямоугольника на экран с нужным шейдером, читающим эту текстуру

Примеры использования render to texture

- Пост-обработка кадра – реализуется рисованием кадра в текстуру, и затем рисованием полноэкранного прямоугольника на экран с нужным шейдером, читающим эту текстуру
 - Размытие

Размытие



Примеры использования render to texture

- Пост-обработка кадра – реализуется рисованием кадра в текстуру, и затем рисованием полноэкранного прямоугольника на экран с нужным шейдером, читающим эту текстуру
 - Размытие

Примеры использования render to texture

- Пост-обработка кадра – реализуется рисованием кадра в текстуру, и затем рисованием полноэкранного прямоугольника на экран с нужным шейдером, читающим эту текстуру
 - Размытие
 - Свечение (bloom)

Свечение



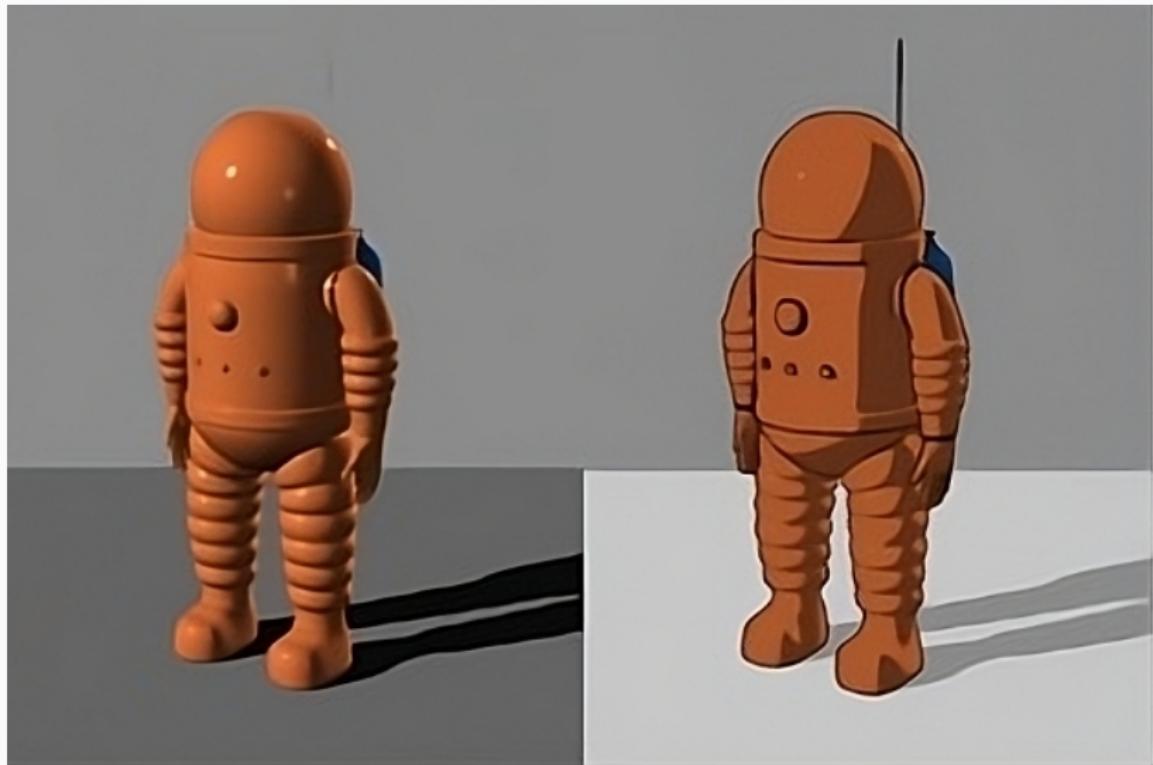
Примеры использования render to texture

- Пост-обработка кадра – реализуется рисованием кадра в текстуру, и затем рисованием полноэкранного прямоугольника на экран с нужным шейдером, читающим эту текстуру
 - Размытие
 - Свечение (bloom)

Примеры использования render to texture

- Пост-обработка кадра – реализуется рисованием кадра в текстуру, и затем рисованием полноэкранного прямоугольника на экран с нужным шейдером, читающим эту текстуру
 - Размытие
 - Свечение (bloom)
 - Toon shading (edge detection, color grading)

Toon shading



Примеры использования render to texture

- Пост-обработка кадра – реализуется рисованием кадра в текстуру, и затем рисованием полноэкранного прямоугольника на экран с нужным шейдером, читающим эту текстуру
 - Размытие
 - Свечение (bloom)
 - Toon shading (edge detection, color grading)

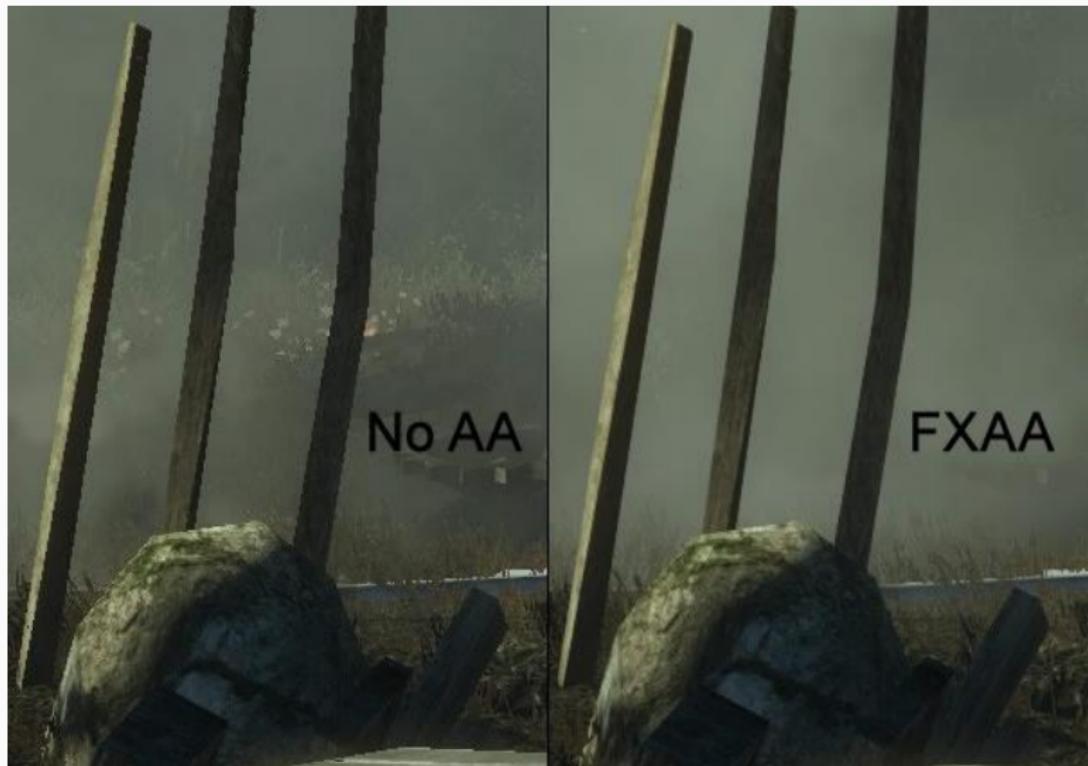
Примеры использования render to texture

- Пост-обработка кадра – реализуется рисованием кадра в текстуру, и затем рисованием полноэкранного прямоугольника на экран с нужным шейдером, читающим эту текстуру
 - Размытие
 - Свечение (bloom)
 - Toon shading (edge detection, color grading)
 - HDR, гамма-коррекция

Примеры использования render to texture

- Пост-обработка кадра – реализуется рисованием кадра в текстуру, и затем рисованием полноэкранного прямоугольника на экран с нужным шейдером, читающим эту текстуру
 - Размытие
 - Свечение (bloom)
 - Toon shading (edge detection, color grading)
 - HDR, гамма-коррекция
 - Сглаживание (FXAA)

FXAA



Примеры использования render to texture

- Пост-обработка кадра – реализуется рисованием кадра в текстуру, и затем рисованием полноэкранного прямоугольника на экран с нужным шейдером, читающим эту текстуру
 - Размытие
 - Свечение (bloom)
 - Toon shading (edge detection, color grading)
 - HDR, гамма-коррекция
 - Сглаживание (FXAA)

Примеры использования render to texture

- Пост-обработка кадра – реализуется рисованием кадра в текстуру, и затем рисованием полноэкранного прямоугольника на экран с нужным шейдером, читающим эту текстуру
 - Размытие
 - Свечение (bloom)
 - Toon shading (edge detection, color grading)
 - HDR, гамма-коррекция
 - Сглаживание (FXAA)
 - И т.д.

Примеры использования render to texture

- Пост-обработка кадра – реализуется рисованием кадра в текстуру, и затем рисованием полноэкранного прямоугольника на экран с нужным шейдером, читающим эту текстуру
 - Размытие
 - Свечение (bloom)
 - Toon shading (edge detection, color grading)
 - HDR, гамма-коррекция
 - Сглаживание (FXAA)
 - И т.д.
- Тени (shadow maps)

Shadow mapping



Примеры использования render to texture

- Пост-обработка кадра – реализуется рисованием кадра в текстуру, и затем рисованием полноэкранного прямоугольника на экран с нужным шейдером, читающим эту текстуру
 - Размытие
 - Свечение (bloom)
 - Toon shading (edge detection, color grading)
 - HDR, гамма-коррекция
 - Сглаживание (FXAA)
 - И т.д.
- Тени (shadow maps)

Примеры использования render to texture

- Пост-обработка кадра – реализуется рисованием кадра в текстуру, и затем рисованием полноэкранного прямоугольника на экран с нужным шейдером, читающим эту текстуру
 - Размытие
 - Свечение (bloom)
 - Toon shading (edge detection, color grading)
 - HDR, гамма-коррекция
 - Сглаживание (FXAA)
 - И т.д.
- Тени (shadow maps)
- Отражения

Примеры использования render to texture

- Пост-обработка кадра – реализуется рисованием кадра в текстуру, и затем рисованием полноэкранного прямоугольника на экран с нужным шейдером, читающим эту текстуру
 - Размытие
 - Свечение (bloom)
 - Toon shading (edge detection, color grading)
 - HDR, гамма-коррекция
 - Сглаживание (FXAA)
 - И т.д.
- Тени (shadow maps)
- Отражения
- Deferred shading

Примеры использования render to texture

- Пост-обработка кадра – реализуется рисованием кадра в текстуру, и затем рисованием полноэкранного прямоугольника на экран с нужным шейдером, читающим эту текстуру
 - Размытие
 - Свечение (bloom)
 - Toon shading (edge detection, color grading)
 - HDR, гамма-коррекция
 - Сглаживание (FXAA)
 - И т.д.
- Тени (shadow maps)
- Отражения
- Deferred shading
- И очень много другого

Размытие

- Усреднение значений соседних пикселей в некоторой окрестности

Размытие

- Усреднение значений соседних пикселей в некоторой окрестности
- Box blur: все веса одинаковые, получается слегка угловатым

Размытие

- Усреднение значений соседних пикселей в некоторой окрестности
- Box blur: все веса одинаковые, получается слегка угловатым
- Gaussian blur: веса пропорциональны гауссиане $\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{r^2}\right)$, получается равномерное сглаживание

Размытие

- Усреднение значений соседних пикселей в некоторой окрестности
- Box blur: все веса одинаковые, получается слегка угловатым
- Gaussian blur: веса пропорциональны гауссиане $\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{r^2}\right)$, получается равномерное сглаживание
- Несколько итераций box blur похожи на один gaussian blur (центральная предельная теорема)

Размытие

- Усреднение значений соседних пикселей в некоторой окрестности
- Box blur: все веса одинаковые, получается слегка угловатым
- Gaussian blur: веса пропорциональны гауссиане $\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{r^2}\right)$, получается равномерное сглаживание
- Несколько итераций box blur похожи на один gaussian blur (центральная предельная теорема)
- Обычно gaussian blur делают в два прохода: один размывает по горизонтали, второй – по вертикали (*separable blur*)

Box blur

```
uniform sampler2D source;

in vec2 texcoord;

out vec4 out_color;

void main()
{
    vec4 sum = vec4(0.0);
    const int N = 5;

    for (int x = -N; x <= N; ++x) {
        for (int y = -N; y <= N; ++y) {
            sum += texture(source, texcoord +
                           vec2(x,y) / vec2(textureSize(source, 0)));
        }
    }

    out_color = sum / float((2*N+1)*(2*N+1));
}
```

Gaussian blur

```
uniform sampler2D source;

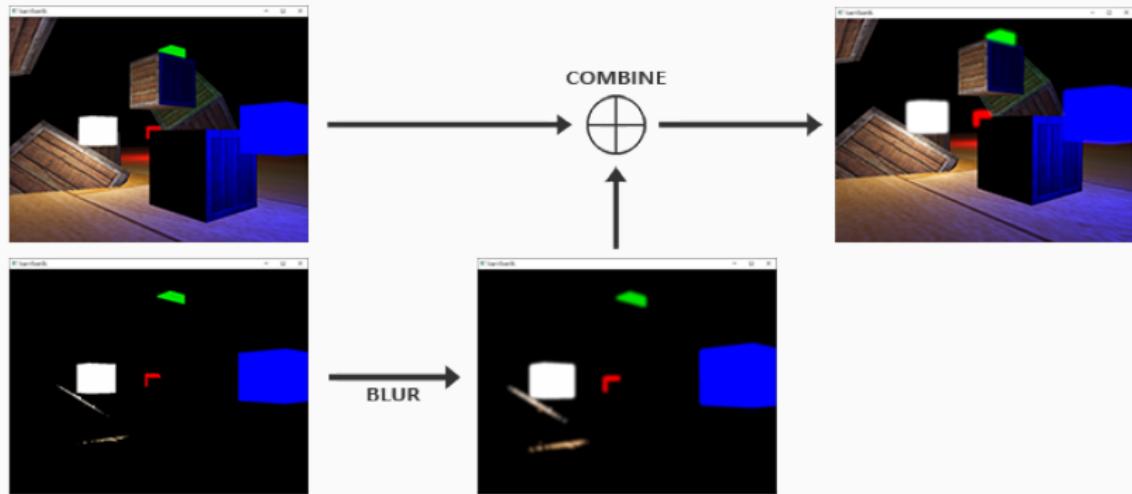
in vec2 texcoord;

out vec4 out_color;

void main()
{
    vec4 sum = vec4(0.0);
    float sum_w = 0.0;
    const int N = 5;
    float radius = 3.0;

    for (int x = -N; x <= N; ++x) {
        for (int y = -N; y <= N; ++y) {
            float c = exp(-float(x*x + y*y) / (radius*radius));
            sum += c * texture(source, texcoord +
                vec2(x,y) / vec2(textureSize(source, 0)));
            sum_w += c;
        }
    }
}
```

Bloom



Toon shading (cel shading)

- Edge detection + color grading

Toon shading (cel shading)

- Edge detection + color grading
- Edge detection: шейдер находит и выделяет резкие перепады цвета или глубины (используя, например, *Sobel filter*)

Toon shading (cel shading)

- Edge detection + color grading
- Edge detection: шейдер находит и выделяет резкие перепады цвета или глубины (используя, например, *Sobel filter*)
- Color grading: палитра цветов искусственно уменьшается (например, сжимается до 2-3 бит на канал)

Ссылки

- learnopengl.com/Advanced-Lighting/Bloom
- Gaussian blur (youtube video tutorial)