

Компьютерная графика

Лекция 8: Stencil bufer, framebuffer, renderbuffer, пост-обработка, anti-aliasing

2021

Stencil buffer (буфер трафарета)

- ▶ Особый буфер, хранящий произвольные данные, с особыми побитовыми операциями над ними

Stencil buffer (буфер трафарета)

- ▶ Особый буфер, хранящий произвольные данные, 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 (depth test)

Stencil buffer (буфер трафарета)

- ▶ Особый буфер, хранящий произвольные данные, 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 (depth test)
- ▶ У дефолтного фреймбуфера часть есть 8-битный stencil буфер (зависит от настроек контекста OpenGL)

Stencil buffer (буфер трафарета)

- ▶ Особый буфер, хранящий произвольные данные, 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 (depth test)
- ▶ У дефолтного фреймбуфера часть есть 8-битный 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, 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 (depth test)
- ▶ У дефолтного фреймбуфера часть есть 8-битный 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` - одна из констант `GL_ALWAYS`, `GL_LESS`, `GL_GREATER`, `GL_EQUAL`, ...
 - ▶ `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` - одна из констант `GL_ALWAYS`, `GL_LESS`, `GL_GREATER`, `GL_EQUAL`, ...
 - ▶ `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` - что делать, если пиксель не прошёл stencil тест
 - ▶ `dpfail` - что делать, если пиксель не прошёл depth тест
 - ▶ `dppass` - что делать, если пиксель прошёл оба теста

Stencil тест

- ▶ Как записать значение в stencil буфер? `glStencilOp`
 - ▶ `sfail` - что делать, если пиксель не прошёл stencil тест
 - ▶ `dpfail` - что делать, если пиксель не прошёл depth тест
 - ▶ `dppass` - что делать, если пиксель прошёл оба теста
- ▶ Возможные значения `sfail`, `dpfail` 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

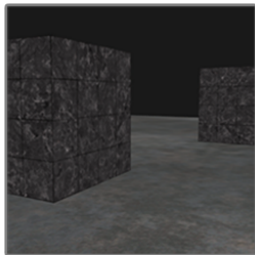
Stencil тест

- ▶ 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

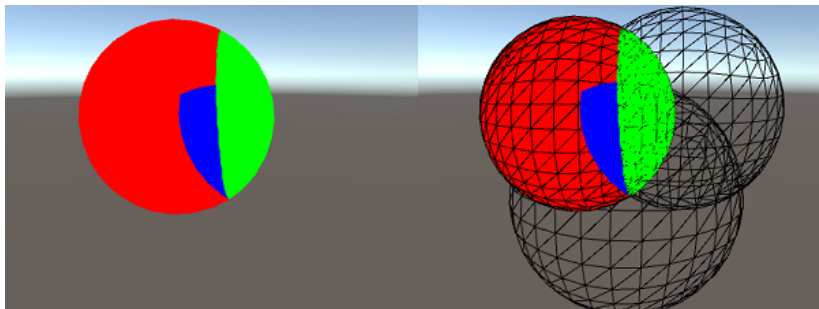


Stencil buffer



After stencil test

Stencil test



Stencil test

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	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

Stencil буфер: применение

- ▶ Некоторые алгоритмы рисования теней (shadow volumes)

Shadow volumes (stencil shadows)



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
 - ▶ UI, который нужно нарисовать в какой-то ограниченной области экрана (например, scroll)

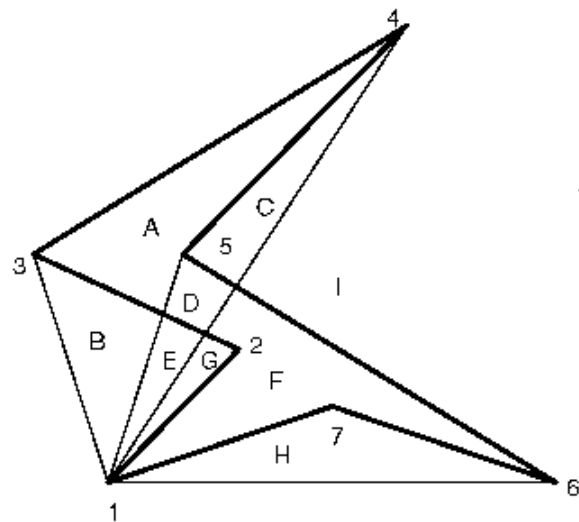
Scroll View

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)
 - ▶ Рисование невыпуклых полигонов (odd-even rule)

Невыпуклый полигон



^AA: 134
B: 123 134
C: 134 145
^{*}D: 134 145 156
E: 123 134 145 156
^AF: 156
G: 123 156
H: 156 167
I: (none)

Stencil буфер: ссылки

- ▶ [khronos.org/opengl/wiki/Stencil_Test](https://www.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 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 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
- ▶ Можно вызвать
`glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER, fbo)` - это эквивалентно

`glBindFramebuffer(GL_DRAW_FRAMEBUFFER, fbo);`
`glBindFramebuffer(GL_READ_FRAMEBUFFER, fbo);`

Default framebuffer

- ▶ Особый объект, имеет $ID = 0$

Default framebuffer

- ▶ Особый объект, имеет $ID = 0$
- ▶ Создаётся при создании OpenGL-контекста

Default framebuffer

- ▶ Особый объект, имеет $ID = 0$
- ▶ Создаётся при создании OpenGL-контекста
- ▶ Настроен, чтобы рисовать на экран, к которому привязан контекст

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

- ▶ 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

Чтение из фреймбуфера

- ▶ `glReadPixels` - достаёт пиксели из определённого участка текущего `GL_READ_FRAMEBUFFER` (можно прочитать цвет, глубину или stencil)

Чтение из фреймбуфера

- ▶ `glReadPixels` - достаёт 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)

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 буферы
 - ▶ Максимальное количество:
`glGet(GL_MAX_COLOR_ATTACHMENTS)`
 - ▶ Номер (0..7) - то, что мы указываем как `location` для выходной переменной фрагментного шейдера
`layout (location = 0) ...`

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)`
 - ▶ Номер (0..7) - то, что мы указываем как location для выходной переменной фрагментного шейдера
`layout (location = 0) ...`
- ▶ `GL_DEPTH_ATTACHMENT` - буфер глубины
- ▶ `GL_STENCIL_ATTACHMENT` - stencil буфер

Framebuffer attachments

- ▶ Связать текстуру с фреймбуфером:
`glFramebufferTexture`

Framebuffer attachments

- ▶ Связать текстуру с фреймбуфером:
`glFramebufferTexture`
 - ▶ `target` - текстура будет привязана к текущему фреймбуферу с таким таргетом (`GL_READ_FRAMEBUFFER` или `GL_DRAW_FRAMEBUFFER`)

Framebuffer attachments

- ▶ Связать текстуру с фреймбуфером:
`glFramebufferTexture`
 - ▶ `target` - текстура будет привязана к текущему фреймбуферу с таким таргетом (`GL_READ_FRAMEBUFFER` или `GL_DRAW_FRAMEBUFFER`)
 - ▶ `attachment` - `GL_COLOR_ATTACHMENT0`, ...

Framebuffer attachments

- ▶ Связать текстуру с фреймбуфером:
`glFramebufferTexture`
 - ▶ `target` - текстура будет привязана к текущему фреймбуферу с таким таргетом (`GL_READ_FRAMEBUFFER` или `GL_DRAW_FRAMEBUFFER`)
 - ▶ `attachment` - `GL_COLOR_ATTACHMENT0`, ...
 - ▶ `texture` - ID текстуры (делать её текущей не нужно)

Framebuffer attachments

- ▶ Связать текстуру с фреймбуфером:
`glFramebufferTexture`
 - ▶ `target` - текстура будет привязана к текущему фреймбуферу с таким таргетом (`GL_READ_FRAMEBUFFER` или `GL_DRAW_FRAMEBUFFER`)
 - ▶ `attachment` - `GL_COLOR_ATTACHMENT0`, ...
 - ▶ `texture` - ID текстуры (делать её текущей не нужно)
 - ▶ `level` - mipmap-уровень текстуры, в который будет осуществляться рисование

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 mipmap-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 mipmap-уровней одной текстуры к одному или нескольким фреймбуферам
- ▶ Можно привязать одномерные и двумерные текстуры, грани subemap-текстуры (`glFramebufferTexture2D`), слои трёхмерных или 2D-array текстур (`glFramebufferTexture3D` или `glFramebufferTextureLayer`)

Framebuffer completeness

- ▶ У фреймбуферов есть особое свойство - completeness: означает, можно ли рисовать в этот фреймбуфер

Framebuffer completeness

- ▶ У фреймбуферов есть особое свойство - completeness: означает, можно ли рисовать в этот фреймбуфер
- ▶ Фреймбуфер считается complete, если
 - ▶ Размеры всех его attachment'ов совпадают

Framebuffer completeness

- ▶ У фреймбуферов есть особое свойство - completeness: означает, можно ли рисовать в этот фреймбуфер
- ▶ Фреймбуфер считается complete, если
 - ▶ Размеры всех его attachment'ов совпадают
 - ▶ Все attachment'ы имеют правильный формат

Framebuffer completeness

- ▶ У фреймбуферов есть особое свойство - completeness: означает, можно ли рисовать в этот фреймбуфер
- ▶ Фреймбуфер считается complete, если
 - ▶ Размеры всех его attachment'ов совпадают
 - ▶ Все attachment'ы имеют правильный формат
- ▶ Проверить completeness - `glCheckFramebufferStatus`: вернёт `GL_FRAMEBUFFER_COMPLETE` или некий код ошибки

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

Viewport

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

Viewport

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

Viewport

- ▶ `glViewport` настраивает преобразование из координат $[-1, 1]^2$ в пиксельные координаты
- ▶ Никак не связан с фреймбуфером
- ▶ Но обычно мы хотим, чтобы viewport совпадал с размером текущего фреймбуфера

Viewport

- ▶ `glViewport` настраивает преобразование из координат $[-1, 1]^2$ в пиксельные координаты
- ▶ Никак не связан с фреймбуфером
- ▶ Но обычно мы хотим, чтобы viewport совпадал с размером текущего фреймбуфера
- ▶ \Rightarrow Перед рисованием с помощью фреймбуфера надо подумать о viewport'e

Viewport

- ▶ `glViewport` настраивает преобразование из координат $[-1, 1]^2$ в пиксельные координаты
- ▶ Никак не связан с фреймбуфером
- ▶ Но обычно мы хотим, чтобы viewport совпадал с размером текущего фреймбуфера
- ▶ \Rightarrow Перед рисованием с помощью фреймбуфера надо подумать о viewport'e
- ▶ N.B. `glClear` игнорирует viewport

Рисование в текстуру: код

```
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 FBO
glBindFramebuffer(GL_DRAW_FRAMEBUFFER, fbo);
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);
glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
glViewport(0, 0, screen_width, screen_height);
drawSomethingElse();
```

Renderbuffers

- ▶ Объекты OpenGL, хранящие пиксели

Renderbuffers

- ▶ Объекты OpenGL, хранящие пиксели
- ▶ Нельзя загрузить данные, нет режимов фильтрации, нет mipmap

Renderbuffers

- ▶ Объекты OpenGL, хранящие пиксели
- ▶ Нельзя загрузить данные, нет режимов фильтрации, нет mipmaps
- ▶ 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

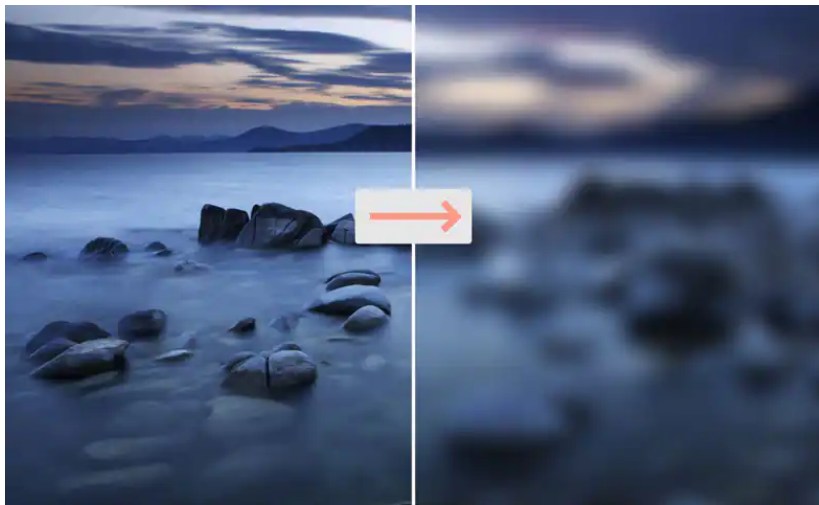
Примеры использования render to texture

- ▶ Пост-обработка кадра
 - ▶ Реализуется рисованием полноэкранного прямоугольника с нужным шейдером

Примеры использования render to texture

- ▶ Пост-обработка кадра
 - ▶ Реализуется рисованием полноэкранного прямоугольника с нужным шейдером
 - ▶ Размытие

Размытие



Примеры использования render to texture

- ▶ Пост-обработка кадра
 - ▶ Реализуется рисованием полноэкранного прямоугольника с нужным шейдером
 - ▶ Размытие
 - ▶ Свечение (bloom)

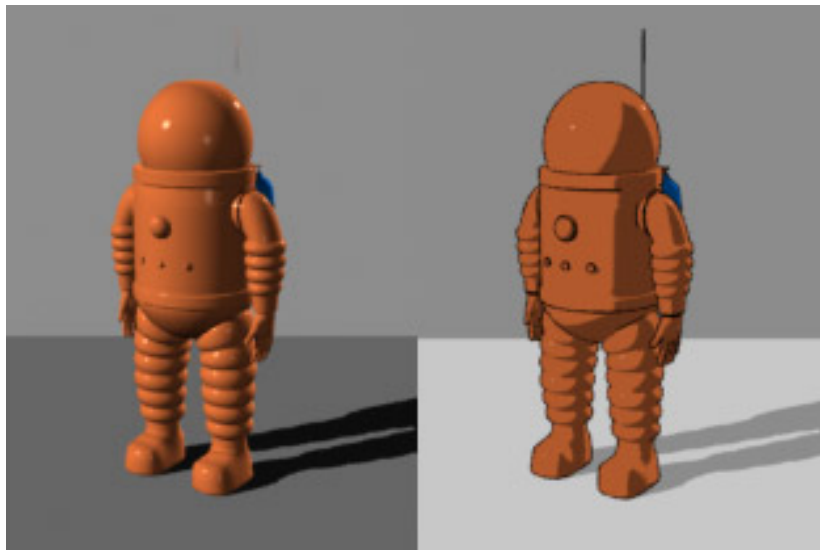
Свечение



Примеры использования render to texture

- ▶ Пост-обработка кадра
 - ▶ Реализуется рисованием полноэкранного прямоугольника с нужным шейдером
 - ▶ Размытие
 - ▶ Свечение (bloom)
 - ▶ Toon shading (edge detection, color grading)

Toon shading



Примеры использования render to texture

- ▶ Пост-обработка кадра
 - ▶ Реализуется рисованием полноэкранного прямоугольника с нужным шейдером
 - ▶ Размытие
 - ▶ Свечение (bloom)
 - ▶ Toon shading (edge detection, color grading)
 - ▶ HDR, гамма-коррекция

Примеры использования render to texture

- ▶ Пост-обработка кадра
 - ▶ Реализуется рисованием полноэкранного прямоугольника с нужным шейдером
 - ▶ 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 полноэкранного прямоугольника с нужным шейдером
 - ▶ 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 полноэкранного прямоугольника с нужным шейдером
 - ▶ 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 полноэкранного прямоугольника с нужным шейдером
 - ▶ Размытие
 - ▶ Свечение (bloom)
 - ▶ Toon shading (edge detection, color grading)
 - ▶ HDR, гамма-коррекция
 - ▶ Сглаживание (FXAA)
 - ▶ И т.д.
- ▶ Тени (shadow maps)
- ▶ Отражения (как environment maps, но рисующиеся в реальном времени)

Примеры использования render to texture

- ▶ Пост-обработка кадра
 - ▶ Реализуется рисованием полноэкранного прямоугольника с нужным шейдером
 - ▶ Размытие
 - ▶ Свечение (bloom)
 - ▶ Toon shading (edge detection, color grading)
 - ▶ HDR, гамма-коррекция
 - ▶ Сглаживание (FXAA)
 - ▶ И т.д.
- ▶ Тени (shadow maps)
- ▶ Отражения (как environment maps, но рисующиеся в реальном времени)
- ▶ Deferred shading

Примеры использования render to texture

- ▶ Пост-обработка кадра
 - ▶ Реализуется рисованием полноэкранного прямоугольника с нужным шейдером
 - ▶ Размытие
 - ▶ Свечение (bloom)
 - ▶ Toon shading (edge detection, color grading)
 - ▶ HDR, гамма-коррекция
 - ▶ Сглаживание (FXAA)
 - ▶ И т.д.
- ▶ Тени (shadow maps)
- ▶ Отражения (как environment maps, но рисующиеся в реальном времени)
- ▶ Deferred shading
- ▶ И т.д.

Размытие

- ▶ Усреднение значений соседних пикселей

Размытие

- ▶ Усреднение значений соседних пикселей
- ▶ Box blur: все веса одинаковые, получается слегка угловатым

- ▶ Усреднение значений соседних пикселей
- ▶ 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
- ▶ 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

Размытие

- ▶ Усреднение значений соседних пикселей
- ▶ 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
- ▶ Обычно gaussian blur делают в два прохода: один размывает по горизонтали, второй - по вертикали

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)));
        }
    }

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

Gaussian blur

```
uniform sampler2D source;

in vec2 texcoord;

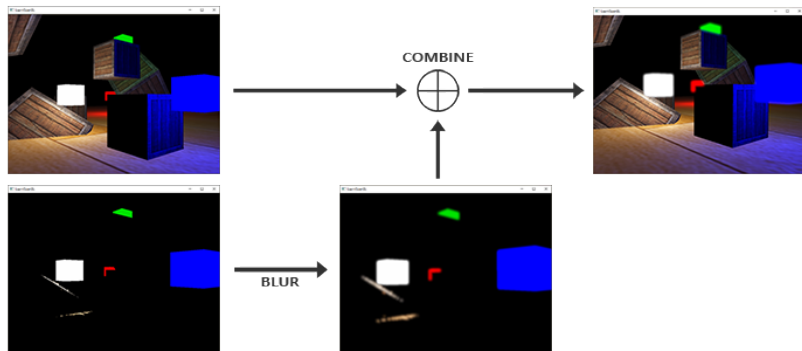
out vec4 out_color;

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)));
            sum_w += c;
        }
    }

    out_color = sum / sum_w;
}
```

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)

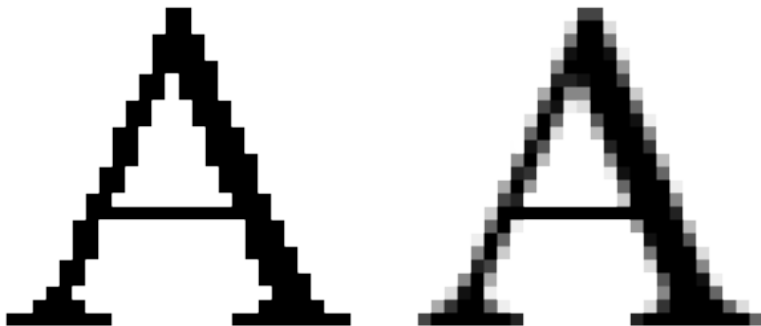
- ▶ Edge detection + color grading
- ▶ Edge detection: шейдер находит и выделяет резкие перепады цвета или глубины (используя, например, Sobel filter)
- ▶ Color grading: палитра цветов искусственно уменьшается (например, сжимается до 2-3 бит на канал)

Aliasing

- ▶ Термин из обработки сигналов: артефакт, возникающий при восстановлении сигнала по недостаточно большому количеству измерений

Aliasing

- ▶ Термин из обработки сигналов: артефакт, возникающий при восстановлении сигнала по недостаточно большому количеству измерений
- ▶ В графике: "лесенка" из пикселей на границе объекта



Anti-aliasing: методы

- ▶ Вручную сглаживать градиентом (2D, карты, UI)

Anti-aliasing: методы

- ▶ Вручную сглаживать градиентом (2D, карты, UI)
- ▶ Supersampling: рисовать увеличенную (x4) картинку в текстуру, затем уменьшать размер до требуемого, усредняя значения пикселей

Anti-aliasing: методы

- ▶ Вручную сглаживать градиентом (2D, карты, UI)
- ▶ Supersampling: рисовать увеличенную (x4) картинку в текстуру, затем уменьшать размер до требуемого, усредняя значения пикселей
 - ▶ Работает приемлемо, но очень дорого

Anti-aliasing: методы

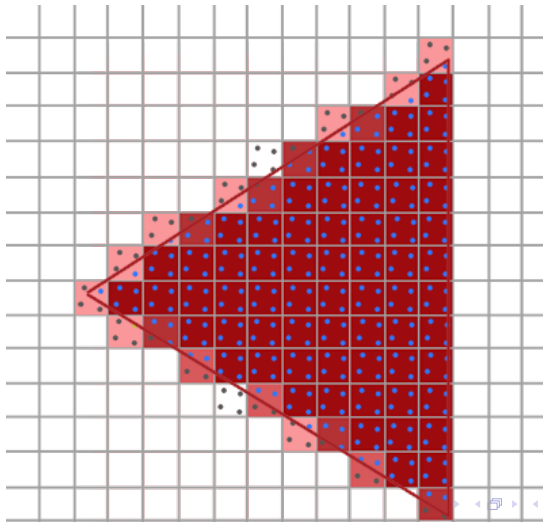
- ▶ Вручную сглаживать градиентом (2D, карты, UI)
- ▶ Supersampling: рисовать увеличенную (x4) картинку в текстуру, затем уменьшать размер до требуемого, усредняя значения пикселей
 - ▶ Работает приемлемо, но очень дорого
- ▶ Multisampling: улучшенный supersampling

Multisampling

- ▶ Идея: алиасинг обычно возникает на границе полигона

Multisampling

- ▶ Идея: алиасинг обычно возникает на границе полигона
- ▶ Запустим фрагментный шейдер один раз на пиксель, но запомним, какую часть пикселя он покрывает



Multisampling в OpenGL

- ▶ Тестура с target = GL_TEXTURE_2D_MULTISAMPLE (данные инициализируются через glTexImage2DMultisample)

Multisampling в OpenGL

- ▶ Тестура с target = `GL_TEXTURE_2D_MULTISAMPLE` (данные инициализируются через `glTexImage2DMultisample`)
- ▶ Renderbufer: `glRenderbufferStorageMultisample`

Multisampling в OpenGL

- ▶ Тестура с target = GL_TEXTURE_2D_MULTISAMPLE (данные инициализируются через `glTexImage2DMultisample`)
- ▶ Renderbufer: `glRenderbufferStorageMultisample`
- ▶ Рисование во фреймбуфер с такими текстурами/renderbuffer'ами будет делать multisampling

Multisampling: ссылки

- ▶ [khronos.org/opengl/wiki/Multisampling](https://www.khronos.org/opengl/wiki/Multisampling)
- ▶ learnopengl.com/Advanced-OpenGL/Anti-Aliasing