Компьютерная графика

Лекция 5: Текстуры

2021

Что такое текстуры?

- Изображения в памяти GPU

Что такое текстуры?

- Изображения в памяти GPU
- Их можно читать из шейдеров

Что такое текстуры?

- Изображения в памяти GPU
- Их можно читать из шейдеров
- В них можно загружать пиксели

Что такое текстуры?

- Изображения в памяти GPU
- Их можно читать из шейдеров
- В них можно загружать пиксели
- В них можно рисовать (вместо рисования в окно)

Что такое текстуры?

- Изображения в памяти GPU
- Их можно читать из шейдеров
- В них можно загружать пиксели
- В них можно рисовать (вместо рисования в окно)
- Поддерживают много специфичных для изображений операций

Что нужно знать про текстуры?

- Типы текстур в OpenGL

Что нужно знать про текстуры?

- Типы текстур в OpenGL
- Как работать с текстурами в шейдере

Что нужно знать про текстуры?

- Типы текстур в OpenGL
- Как работать с текстурами в шейдере
- Какие есть настройки чтения из текстур

Что нужно знать про текстуры?

- Типы текстур в OpenGL
- Как работать с текстурами в шейдере
- Какие есть настройки чтения из текстур
- Как загрузить данные в текстуру

Что нужно знать про текстуры?

- Типы текстур в OpenGL
- Как работать с текстурами в шейдере
- Какие есть настройки чтения из текстур
- Как загрузить данные в текстуру
- Как привязать текстуру к шейдеру

Что нужно знать про текстуры?

- Типы текстур в OpenGL
- Как работать с текстурами в шейдере
- Какие есть настройки чтения из текстур
- Как загрузить данные в текстуру
- Как привязать текстуру к шейдеру
- Как использовать текстуру для 3D моделей

Что такое текстуры в OpenGL?

- Объекты OpenGL

Что такое текстуры в OpenGL?

- Объекты OpenGL
- `glGenTextures`, `glDeleteTextures`, `glBindTexture`

Что такое текстуры в OpenGL?

- Объекты OpenGL
- `glGenTextures`, `glDeleteTextures`, `glBindTexture`
- `target` - тип текстуры (об этом чуть позже)

Что такое текстуры в OpenGL?

- Объекты OpenGL
- `glGenTextures`, `glDeleteTextures`, `glBindTexture`
- `target` - тип текстуры (об этом чуть позже)
- Если текстура сделана текущей для какого-то `target`, её никогда нельзя сделать текущей для другого `target`
  - Таким образом, тип текстуры определяется первым вызовом `glBindTexture` для неё

Что такое текстуры в OpenGL?

- Объекты OpenGL
- `glGenTextures`, `glDeleteTextures`, `glBindTexture`
- `target` - тип текстуры (об этом чуть позже)
- Если текстура сделана текущей для какого-то `target`, её никогда нельзя сделать текущей для другого `target`
  - Таким образом, тип текстуры определяется первым вызовом `glBindTexture` для неё
- ID текущей для `target` текстуры хранится не в контектсе OpenGL, а в т.н. texture unit'ах (о них позже)

Типы текстур

- `GL_TEXTURE_1D` - одномерная текстура (полоска пикселей)

Типы текстур

- `GL_TEXTURE_1D` - одномерная текстура (полоска пикселей)
- `GL_TEXTURE_2D` - двумерная текстура

Типы текстур

- `GL_TEXTURE_1D` - одномерная текстура (полоска пикселей)
- `GL_TEXTURE_2D` - двумерная текстура
- `GL_TEXTURE_3D` - текстура текстура

Типы текстур

- `GL_TEXTURE_1D` - одномерная текстура (полоска пикселей)
- `GL_TEXTURE_2D` - двумерная текстура
- `GL_TEXTURE_3D` - текстура текстура
- `GL_TEXTURE_1D_ARRAY` - массив одномерных текстур одинакового размера

Типы текстур

- `GL_TEXTURE_1D` - одномерная текстура (полоска пикселей)
- `GL_TEXTURE_2D` - двумерная текстура
- `GL_TEXTURE_3D` - текстура текстура
- `GL_TEXTURE_1D_ARRAY` - массив одномерных текстур одинакового размера
- `GL_TEXTURE_2D_ARRAY` - массив двумерных текстур одинакового размера

Типы текстур

- `GL_TEXTURE_1D` - одномерная текстура (полоска пикселей)
- `GL_TEXTURE_2D` - двумерная текстура
- `GL_TEXTURE_3D` - текстура текстура
- `GL_TEXTURE_1D_ARRAY` - массив одномерных текстур одинакового размера
- `GL_TEXTURE_2D_ARRAY` - массив двумерных текстур одинакового размера
- `GL_TEXTURE_CUBE_MAP` - текстуры, хранящиеся как 6 граней куба

Типы текстур

- `GL_TEXTURE_1D` - одномерная текстура (полоска пикселей)
- `GL_TEXTURE_2D` - двумерная текстура
- `GL_TEXTURE_3D` - текстура текстура
- `GL_TEXTURE_1D_ARRAY` - массив одномерных текстур одинакового размера
- `GL_TEXTURE_2D_ARRAY` - массив двумерных текстур одинакового размера
- `GL_TEXTURE_CUBE_MAP` - текстуры, хранящиеся как 6 граней куба
- `GL_TEXTURE_CUBE_MAP_ARRAY` - массив cubemap'ов (OpenGL 4.0)

Типы текстур

- `GL_TEXTURE_1D` - одномерная текстура (полоска пикселей)
- `GL_TEXTURE_2D` - двумерная текстура
- `GL_TEXTURE_3D` - текстура текстура
- `GL_TEXTURE_1D_ARRAY` - массив одномерных текстур одинакового размера
- `GL_TEXTURE_2D_ARRAY` - массив двумерных текстур одинакового размера
- `GL_TEXTURE_CUBE_MAP` - текстуры, хранящиеся как 6 граней куба
- `GL_TEXTURE_CUBE_MAP_ARRAY` - массив cubemap'ов (OpenGL 4.0)
- `GL_TEXTURE_RECTANGLE` - прямоугольные текстуры

Типы текстур

- `GL_TEXTURE_1D` - одномерная текстура (полоска пикселей)
- `GL_TEXTURE_2D` - двумерная текстура
- `GL_TEXTURE_3D` - текстура текстура
- `GL_TEXTURE_1D_ARRAY` - массив одномерных текстур одинакового размера
- `GL_TEXTURE_2D_ARRAY` - массив двумерных текстур одинакового размера
- `GL_TEXTURE_CUBE_MAP` - текстуры, хранящиеся как 6 граней куба
- `GL_TEXTURE_CUBE_MAP_ARRAY` - массив cubemap'ов (OpenGL 4.0)
- `GL_TEXTURE_RECTANGLE` - прямоугольные текстуры (плохое название, другие текстуры тоже могут быть прямоугольными; в современном OpenGL бесполезны)

Типы текстур

- `GL_TEXTURE_1D` - одномерная текстура (полоска пикселей)
- `GL_TEXTURE_2D` - двумерная текстура
- `GL_TEXTURE_3D` - текстура текстура
- `GL_TEXTURE_1D_ARRAY` - массив одномерных текстур одинакового размера
- `GL_TEXTURE_2D_ARRAY` - массив двумерных текстур одинакового размера
- `GL_TEXTURE_CUBE_MAP` - текстуры, хранящиеся как 6 граней куба
- `GL_TEXTURE_CUBE_MAP_ARRAY` - массив cubemap'ов (OpenGL 4.0)
- `GL_TEXTURE_RECTANGLE` - прямоугольные текстуры (плохое название, другие текстуры тоже могут быть прямоугольными; в современном OpenGL бесполезны)
- `GL_TEXTURE_BUFFER` - текстуры, берущие данные из buffer object'a

Текстуры в шейдере - samplers

- В шейдере текстура представлена uniform-переменной с особым типом, соответствующим типу текстуры и формату пикселей (floating-point / integer / unsigned integer)

Текстуры в шейдере - samplers

- В шейдере текстура представлена uniform-переменной с особым типом, соответствующим типу текстуры и формату пикселей (floating-point / integer / unsigned integer)
- `sampler1D/isampler1D/usampler1D`

Текстуры в шейдере - samplers

- В шейдере текстура представлена uniform-переменной с особым типом, соответствующим типу текстуры и формату пикселей (floating-point / integer / unsigned integer)
- `sampler1D/isampler1D/usampler1D`
- `sampler2D/isampler2D/usampler2D`

Текстуры в шейдере - samplers

- В шейдере текстура представлена uniform-переменной с особым типом, соответствующим типу текстуры и формату пикселей (floating-point / integer / unsigned integer)
- `sampler1D/isampler1D/usampler1D`
- `sampler2D/isampler2D/usampler2D`
- `sampler3D/isampler3D/usampler3D`

Текстуры в шейдере - samplers

- В шейдере текстура представлена uniform-переменной с особым типом, соответствующим типу текстуры и формату пикселей (floating-point / integer / unsigned integer)
- `sampler1D/isampler1D/usampler1D`
- `sampler2D/isampler2D/usampler2D`
- `sampler3D/isampler3D/usampler3D`
- `sampler1DArray/isampler1DArray/usampler1DArray`

Текстуры в шейдере - samplers

- В шейдере текстура представлена uniform-переменной с особым типом, соответствующим типу текстуры и формату пикселей (floating-point / integer / unsigned integer)
- `sampler1D/isampler1D/usampler1D`
- `sampler2D/isampler2D/usampler2D`
- `sampler3D/isampler3D/usampler3D`
- `sampler1DArray/isampler1DArray/usampler1DArray`
- `sampler2DArray/isampler2DArray/usampler2DArray`

Текстуры в шейдере - samplers

- В шейдере текстура представлена uniform-переменной с особым типом, соответствующим типу текстуры и формату пикселей (floating-point / integer / unsigned integer)
- `sampler1D/isampler1D/usampler1D`
- `sampler2D/isampler2D/usampler2D`
- `sampler3D/isampler3D/usampler3D`
- `sampler1DArray/isampler1DArray/usampler1DArray`
- `sampler2DArray/isampler2DArray/usampler2DArray`
- `samplerCube/isamplerCube/usamplerCube`

Текстуры в шейдере - samplers

- В шейдере текстура представлена uniform-переменной с особым типом, соответствующим типу текстуры и формату пикселей (floating-point / integer / unsigned integer)
- `sampler1D/isampler1D/usampler1D`
- `sampler2D/isampler2D/usampler2D`
- `sampler3D/isampler3D/usampler3D`
- `sampler1DArray/isampler1DArray/usampler1DArray`
- `sampler2DArray/isampler2DArray/usampler2DArray`
- `samplerCube/isamplerCube/usamplerCube`
- `samplerBuffer/isamplerBuffer/usamplerBuffer`

Чтение из текстур

- Как читать из текстуры в шейдере?

Чтение из текстур

- Как читать из текстуры в шейдере?
- `texture(sampler, coords)` - возвращает `vec4/ivec4/uvec4`

Чтение из текстур

- Как читать из текстуры в шейдере?
- `texture(sampler, coords)` - возвращает `vec4/ivec4/uvec4`
- Тип и смысл `coords` зависят от типа текстуры

Чтение из текстур

- Как читать из текстуры в шейдере?
- `texture(sampler, coords)` - возвращает `vec4/ivec4/uvec4`
- Тип и смысл `coords` зависят от типа текстуры
  - Для 1D/2D/3D текстур `float/vec2/vec3`: нормированные координаты ([0..1] по каждой оси)

Чтение из текстур

- Как читать из текстуры в шейдере?
- `texture(sampler, coords)` - возвращает `vec4/ivec4/uvec4`
- Тип и смысл `coords` зависят от типа текстуры
  - Для 1D/2D/3D текстур `float/vec2/vec3`: нормированные координаты ([0..1] по каждой оси)
  - Для 1D/2D array текстур `vec2/vec3`: первые одна/две координаты - нормированные, последняя - номер "слоя"

Чтение из текстур

- Как читать из текстуры в шейдере?
- `texture(sampler, coords)` - возвращает `vec4/ivec4/uvec4`
- Тип и смысл `coords` зависят от типа текстуры
  - Для 1D/2D/3D текстур `float/vec2/vec3`: нормированные координаты ([0..1] по каждой оси)
  - Для 1D/2D array текстур `vec2/vec3`: первые одна/две координаты - нормированные, последняя - номер "слоя"
  - Для cubemap текстур `vec3`: вектор направления из центра куба, возвращается значение из пересечения луча с поверхностью куба

Чтение из текстур

- Как читать из текстуры в шейдере?
- `texture(sampler, coords)` - возвращает `vec4/ivec4/uvec4`
- Тип и смысл `coords` зависят от типа текстуры
  - Для 1D/2D/3D текстур `float/vec2/vec3`: нормированные координаты ([0..1] по каждой оси)
  - Для 1D/2D array текстур `vec2/vec3`: первые одна/две координаты - нормированные, последняя - номер "слоя"
  - Для cubemap текстур `vec3`: вектор направления из центра куба, возвращается значение из пересечения луча с поверхностью куба
- Частое название в случае 2D текстур: UV-координаты

Чтение из текстур

- Текстура хранит набор дискретных пикселей, но обращение к ней происходит по floating-point координатам

Чтение из текстур

- Текстура хранит набор дискретных пикселей, но обращение к ней происходит по floating-point координатам
- $\Rightarrow$ режимы фильтрации текстур
  - `GL_NEAREST` - использовать ближайший к указанным координатам пиксель
  - `GL_LINEAR` - использовать линейную/билинейную/трилинейную интерполяцию между соседними 2/4/8 пикселями (для 1D/2D/3D соответственно)
  - Для array-текстур номер слоя всегда ближайший!

Чтение из текстур

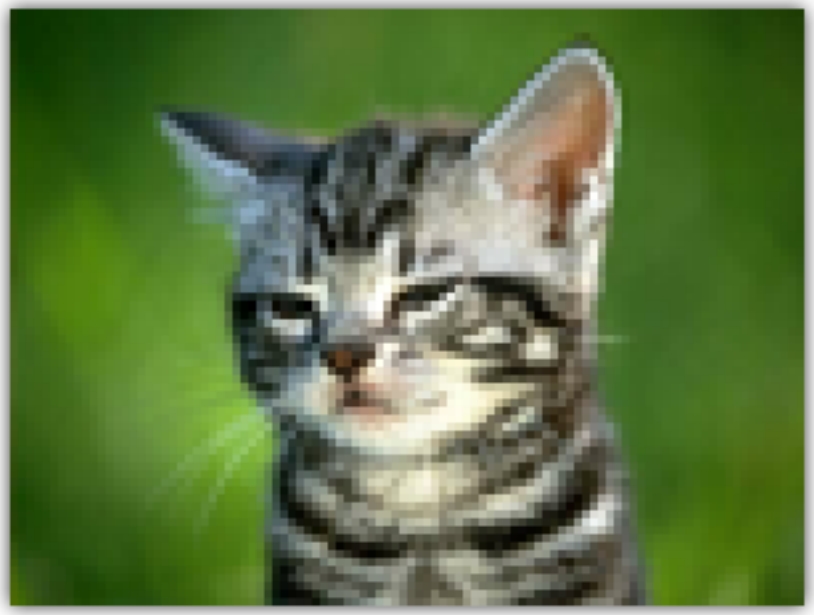
- Текстура хранит набор дискретных пикселей, но обращение к ней происходит по floating-point координатам
- $\Rightarrow$ режимы фильтрации текстур
  - `GL_NEAREST` - использовать ближайший к указанным координатам пиксель
  - `GL_LINEAR` - использовать линейную/билинейную/трилинейную интерполяцию между соседними 2/4/8 пикселями (для 1D/2D/3D соответственно)
  - Для array-текстур номер слоя всегда ближайший!
- Настраиваются отдельно для случая, когда
  - Пиксель текстуры больше пикселя на экране (magnification) - `GL_TEXTURE_MAG_FILTER`
  - Пиксель текстуры меньше пикселя на экране (minification) - `GL_TEXTURE_MIN_FILTER`

Чтение из текстур

- Текстура хранит набор дискретных пикселей, но обращение к ней происходит по floating-point координатам
- $\Rightarrow$ режимы фильтрации текстур
  - `GL_NEAREST` - использовать ближайший к указанным координатам пиксель
  - `GL_LINEAR` - использовать линейную/билинейную/трилинейную интерполяцию между соседними 2/4/8 пикселями (для 1D/2D/3D соответственно)
  - Для array-текстур номер слоя всегда ближайший!
- Настраиваются отдельно для случая, когда
  - Пиксель текстуры больше пикселя на экране (magnification) - `GL_TEXTURE_MAG_FILTER`
  - Пиксель текстуры меньше пикселя на экране (minification) - `GL_TEXTURE_MIN_FILTER`

```
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MAG_FILTER,
    GL_NEAREST)
```

Nearest vs Linear



GL_NEAREST

GL_LINEAR

Mipmaps

- Когда пиксель текстуры меньше пикселя на экране (minification), текстура выглядит плохо:
  - `GL_NEAREST` - часть пикселей текстуры не попадают на экран
  - `GL_LINEAR` - нормально до x2 уменьшения, потом пиксели тоже не попадают на экран

Mipmaps

- Когда пиксель текстуры меньше пикселя на экране (minification), текстура выглядит плохо:
  - `GL_NEAREST` - часть пикселей текстуры не попадают на экран
  - `GL_LINEAR` - нормально до x2 уменьшения, потом пиксели тоже не попадают на экран
- Решение: mipmap-уровни

Mipmaps

- Mipmaps - уменьшенные копии текстуры для использования при минификации

Mipmaps

- Mipmaps - уменьшенные копии текстуры для использования при минификации
- Для текстуры $W \times H$ первый уровень имеет размер $\lceil \frac{W}{2} \rceil \times \lceil \frac{H}{2} \rceil$, второй уровень имеет размер $\lceil \frac{W}{4} \rceil \times \lceil \frac{H}{4} \rceil$, и т.д.
- Для array-текстур отдельный набор mipmap'ов для каждого слоя

Mipmaps

- Mipmaps - уменьшенные копии текстуры для использования при минификации
- Для текстуры $W \times H$ первый уровень имеет размер $\lceil \frac{W}{2} \rceil \times \lceil \frac{H}{2} \rceil$, второй уровень имеет размер $\lceil \frac{W}{4} \rceil \times \lceil \frac{H}{4} \rceil$, и т.д.
- Для array-текстур отдельный набор mipmap'ов для каждого слоя
- Их можно
  - Загрузить отдельно, так же, как саму текстуру
  - Попросить OpenGL сгенерировать на основе самой текстуры
  - Не использовать

Mipmaps

- Опции для `GL_TEXTURE_MIN_FILTER`:

Mipmaps

- Опции для `GL_TEXTURE_MIN_FILTER`:
  - `GL_NEAREST_MIPMAP_NEAREST` - выбирается ближайший mipmap уровень, с него выбирается ближайший пиксель

Mipmaps

- Опции для `GL_TEXTURE_MIN_FILTER`:
  - `GL_NEAREST_MIPMAP_NEAREST` - выбирается ближайший mipmap уровень, с него выбирается ближайший пиксель
  - `GL_LINEAR_MIPMAP_NEAREST` - выбирается ближайший mipmap уровень, с него делается интерполяция ближайших пикселей

Mipmaps

- Опции для `GL_TEXTURE_MIN_FILTER`:
  - `GL_NEAREST_MIPMAP_NEAREST` - выбирается ближайший mipmap уровень, с него выбирается ближайший пиксель
  - `GL_LINEAR_MIPMAP_NEAREST` - выбирается ближайший mipmap уровень, с него делается интерполяция ближайших пикселей
  - `GL_NEAREST_MIPMAP_LINEAR` - выбираются два ближайших mipmap уровня, с них выбираются ближайшие пиксели, между ними происходит линейная интерполяция (включено по умолчанию)

Mipmaps

- Опции для `GL_TEXTURE_MIN_FILTER`:
  - `GL_NEAREST_MIPMAP_NEAREST` - выбирается ближайший mipmap уровень, с него выбирается ближайший пиксель
  - `GL_LINEAR_MIPMAP_NEAREST` - выбирается ближайший mipmap уровень, с него делается интерполяция ближайших пикселей
  - `GL_NEAREST_MIPMAP_LINEAR` - выбираются два ближайших mipmap уровня, с них выбираются ближайшие пиксели, между ними происходит линейная интерполяция (включено по умолчанию)
  - `GL_LINEAR_MIPMAP_LINEAR` - выбираются два ближайших mipmap уровня, в них делается интерполяция ближайших пикселей, между ними происходит линейная интерполяция

Mipmaps

- По умолчанию включен `GL_NEAREST_MIPMAP_LINEAR`
- Если вы забыли сгенерировать/загрузить mipmap-уровни, текстура считается невалидной, и может рисоваться всегда чёрной
- Не забывайте выставлять правильные min/mag filter и/или генерировать mipmap'ы!

Анизотропная фильтрация

- Текстура может быть нормального размера по одной оси, и маленькая по другой

Анизотропная фильтрация

- Текстура может быть нормального размера по одной оси, и маленькая по другой
- Большой mipmap уровень хорош для одной оси, маленький - для другой

Анизотропная фильтрация

- Текстура может быть нормального размера по одной оси, и маленькая по другой
- Большой mipmap уровень хорош для одной оси, маленький - для другой
- Решение: анизотропная фильтрация

Анизотропная фильтрация

- Текстура может быть нормального размера по одной оси, и маленькая по другой
- Большой mipmap уровень хорош для одной оси, маленький - для другой
- Решение: анизотропная фильтрация
- Есть в OpenGL 4.6, но почти везде доступна через расширение `EXT_texture_filter_anisotropic`

Wrapping mode

- При чтении из текстуры координаты могут выходить за пределы диапазона

Wrapping mode

- При чтении из текстуры координаты могут выходить за пределы диапазона
- При `GL_LINEAR` для точек у границы текстуры может не найтись достаточное количество соседних пикселей

Wrapping mode

- При чтении из текстуры координаты могут выходить за пределы диапазона
- При `GL_LINEAR` для точек у границы текстуры может не найтись достаточное количество соседних пикселей
- $\Rightarrow$ Wrapping mode:
  - `GL_CLAMP_TO_EDGE` - брать пиксель с границы
  - `GL_REPEAT` (по умолчанию) - повторять текстуру
  - `GL_MIRRORED_REPEAT` - повторять текстуру, отражая её на каждый повтор

Wrapping mode

- При чтении из текстуры координаты могут выходить за пределы диапазона
- При `GL_LINEAR` для точек у границы текстуры может не найтись достаточное количество соседних пикселей
- $\Rightarrow$ Wrapping mode:
  - `GL_CLAMP_TO_EDGE` - брать пиксель с границы
  - `GL_REPEAT` (по умолчанию) - повторять текстуру
  - `GL_MIRRORED_REPEAT` - повторять текстуру, отражая её на каждый повтор
- Настраивается отдельно для каждой координаты: S, T, R

```
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_S,
    GL_CLAMP_TO_EDGE)
```

Wrapping

GL_REPEAT

GL_MIRRORED_REPEAT

GL_CLAMP_TO_EDGE

GL_CLAMP_TO_BORDER

Выбор mipmap уровня

- Как GPU понимает, какой выбрать mipmap-уровень, и происходит ли minification/magnification?

Выбор mipmap уровня

- Как GPU понимает, какой выбрать mipmap-уровень, и происходит ли minification/magnification?
- По значениям в соседних пикселях

Выбор mipmap уровня

- Как GPU понимает, какой выбрать mipmap-уровень, и происходит ли minification/magnification?
- По значениям в соседних пикселях
- Фрагментный шейдер всегда запускается на группах 2x2 пикселя (даже если часть из них не были растеризованы)

Выбор mipmap уровня

- Как GPU понимает, какой выбрать mipmap-уровень, и происходит ли minification/magnification?
- По значениям в соседних пикселях
- Фрагментный шейдер всегда запускается на группах 2x2 пикселя (даже если часть из них не были растеризованы)
- В GLSL есть функции `dFdx/dFdy` - вычисляют разницу некой величины для пары соседних пикселей в группе 2x2

Выбор mipmap уровня

- Как GPU понимает, какой выбрать mipmap-уровень, и происходит ли minification/magnification?
- По значениям в соседних пикселях
- Фрагментный шейдер всегда запускается на группах 2x2 пикселя (даже если часть из них не были растеризованы)
- В GLSL есть функции `dFdx/dFdy` - вычисляют разницу некой величины для пары соседних пикселей в группе 2x2
- По `dFdx(coords)` и `dFdy(coords)` вычисляется mipmap-уровень

Чтение из текстур

- `textureLod` - обратиться напрямую к указанному mipmap-уровню (LOD = level of detail)

Чтение из текстур

- `textureLod` - обратиться напрямую к указанному mipmap-уровню (LOD = level of detail)
- `texelFetch` - обратиться напрямую к указанному пикселю, минуя всю фильтрацию

Формат текстуры

- Текстура - набор (1D/2D/3D массив или 6 2D массивов) пикселей

Формат текстуры

- Текстура - набор (1D/2D/3D массив или 6 2D массивов) пикселей
- Пиксель - 1, 2, 3 или 4 компоненты в определённом формате

Формат текстуры

- Текстура - набор (1D/2D/3D массив или 6 2D массивов) пикселей
- Пиксель - 1, 2, 3 или 4 компоненты в определённом формате
- Форматов очень много, вот часто встречающиеся:
  - `GL_RGB8` - 3 нормированных 8-битных канала
  - `GL_RGBA8` - 4 нормированных 8-битных канала
  - `GL_RGBA32F` - 4 32-битных floating-point канала
  - `GL_DEPTH_COMPONENT24` - специальный формат для z-буфера

Загрузить данные в текстуру

- 1D: `glTexImage1D`

Загрузить данные в текстуру

- 1D: `glTexImage1D`
- 2D, 1D array или грань cubemap: `glTexImage2D`

Загрузить данные в текстуру

- 1D: `glTexImage1D`
- 2D, 1D array или грань cubemap: `glTexImage2D`
- 3D или 2D array: `glTexImage3D`

Загрузить данные в текстуру

```
glTexImage2D(GLenum target, GLint level,
  GLint internalFormat,
  GLsizei width, GLsizei height, GLint border,
  GLenum format, GLenum type, const GLvoid * data);
```

- `target` - тип текстуры (например, `GL_TEXTURE_2D`)
- `level` - mipmap level, который мы хотим загрузить (0 для основной текстуры)
- `internalFormat` - формат хранения пикселей (например, `GL_RGBA8`)
- `width`, `height` - размер в пикселях
- `border` - легаси, должно быть 0
- `format` - какие компоненты есть в массиве `data` (например, `GL_RGB`)
- `type` - какого типа компоненты в массиве `data` (например, `GL_UNSIGNED_BYTE`)
- `data` - указатель на массив пикселей (сначала первая строка пикселей, потом вторая, и т.д.)

Загрузить данные в текстуру

- Если `data = nullptr`, под текстуру выделится память, но данные не будут записаны

Загрузить данные в текстуру

- Если `data = nullptr`, под текстуру выделится память, но данные не будут записаны
- Есть ограничения на возможные пары `format` и `type` (например, `type = GL_UNSIGNED_SHORT_5_6_5` требует `format = GL_RGB`)

Загрузить данные в текстуру

- Если `data = nullptr`, под текстуру выделится память, но данные не будут записаны
- Есть ограничения на возможные пары `format` и `type` (например, `type = GL_UNSIGNED_SHORT_5_6_5` требует `format = GL_RGB`)
- `format + type` может не совпадать с `internalFormat`, тогда происходит преобразование в `internalFormat`

Загрузить данные в текстуру

- Если `data = nullptr`, под текстуру выделится память, но данные не будут записаны
- Есть ограничения на возможные пары `format` и `type` (например, `type = GL_UNSIGNED_SHORT_5_6_5` требует `format = GL_RGB`)
- `format + type` может не совпадать с `internalFormat`, тогда происходит преобразование в `internalFormat`
- По умолчанию ожидается, что начало каждой строки пикселей в массиве `data` выровнено на 4 байта
- Это может нарушиться, например, с `format = GL_RGB` и `type = GL_UNSIGNED_BYTE` с нечётной шириной текстуры
- Настраивается с помощью `glPixelStorei(GL_UNPACK_ALIGNMENT, 1)`

Генерация mipmap

- После загрузки нулевого mipmap-уровня, можно сгенерировать все остальные с помощью `glGenerateMipmap(target)`

Как связать текстуру и sampler в шейдере?

- ID текущей текстуры для каждого target хранится в т.н. texture unit'е
- Texture unit'ы - **не объекты OpenGL**, их нельзя создавать/удалять
- Их фиксированное число - `glGet(GL_MAX_COMBINED_TEXTURE_IMAGE_UNITS)`, как минимум 48
- Есть текущий texture unit (по умолчанию - 0)
- `glActiveTexture(GL_TEXTURE0 + i)` - сделать текущим texture unit с номером `i`
- `glBindTexture(...)` делает текстуру текущей для данного `target` в текущем `texture unit`

Как связать текстуру и sampler в шейдере?

- В качестве значения uniform-переменной типа `sampler2D` (и т.п.) указывается *номер texture unit'a*

Как связать текстуру и sampler в шейдере?

- В качестве значения uniform-переменной типа `sampler2D` (и т.п.) указывается *номер texture unit'a*
- Если для `sampler2D` установлено значение `i`, то в качестве текстуры будет взята `GL_TEXTURE_2D` из texture unit'a номер `i`

Как связать текстуру и sampler в шейдере?

- В качестве значения uniform-переменной типа `sampler2D` (и т.п.) указывается *номер texture unit'a*
- Если для `sampler2D` установлено значение `i`, то в качестве текстуры будет взята `GL_TEXTURE_2D` из texture unit'a номер `i`
- `glUniform1i(color_texture_location, i)`

Как связать текстуру и sampler в шейдере?

- В качестве значения uniform-переменной типа `sampler2D` (и т.п.) указывается *номер texture unit'a*
- Если для `sampler2D` установлено значение `i`, то в качестве текстуры будет взята `GL_TEXTURE_2D` из texture unit'a номер `i`
- `glUniform1i(color_texture_location, i)`
- Если нужны несколько текстур одновременно в одном шейдере, нужно их сделать текущими для разных texture unit'ов, и передать их номера в uniform-переменные шейдера

Как использовать текстуру для 3D-модели?

- Обычно каждая вершина хранит пару (нормированных) текстурных координат (UV-развёртка)

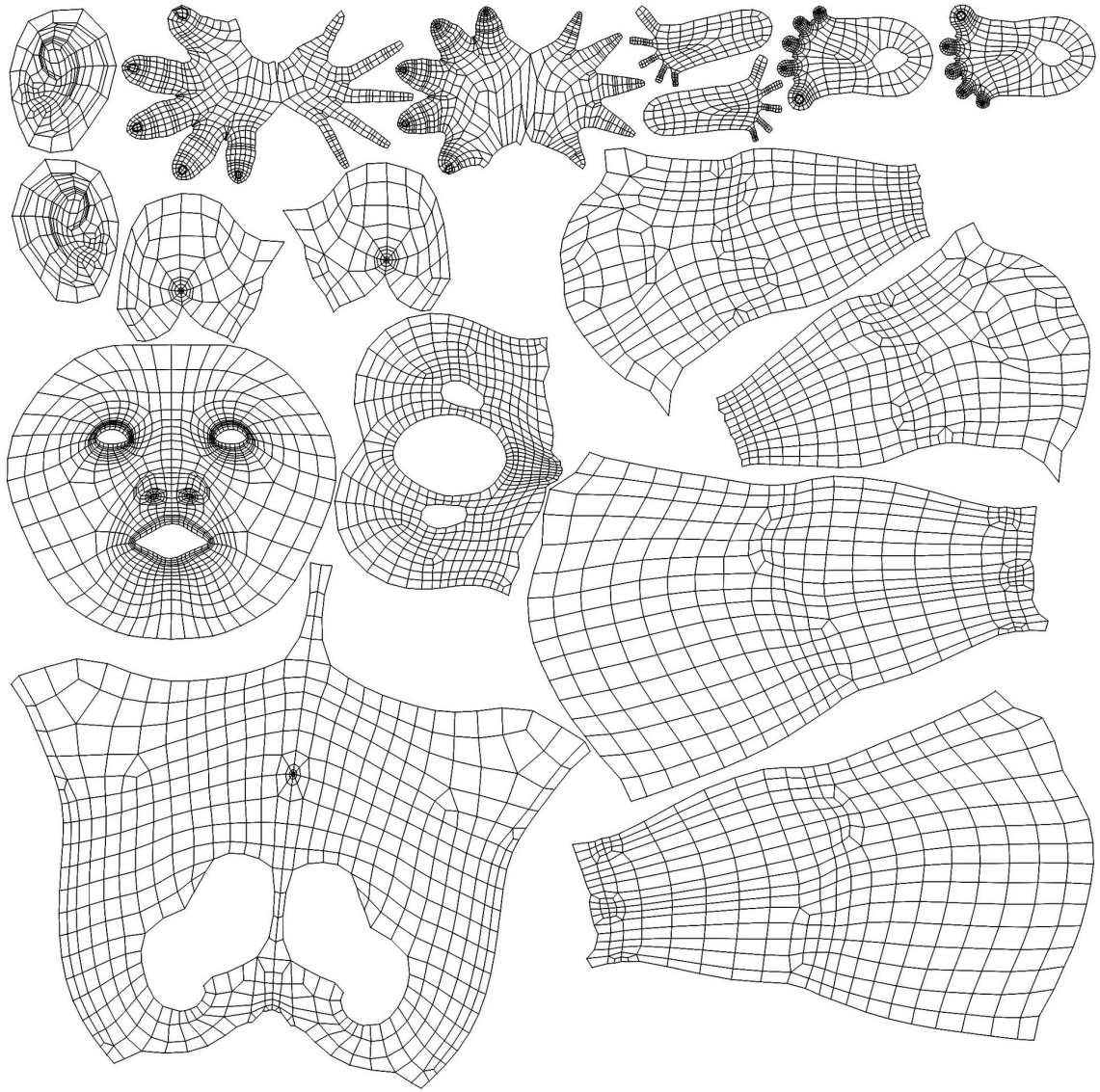
Как использовать текстуру для 3D-модели?

- Обычно каждая вершина хранит пару (нормированных) текстурных координат (UV-развёртка)
- Они передаются из вершинного шейдера во фрагментный и интерполируются

Как использовать текстуру для 3D-модели?

- Обычно каждая вершина хранит пару (нормированных) текстурных координат (UV-развёртка)
- Они передаются из вершинного шейдера во фрагментный и интерполируются
- Интерполированные значения текстурных координат используются во фрагментном шейдере для чтения из текстуры

Как использовать текстуру для 3D-модели?



Форматы изображений

- `glTexImage2D` ожидает на вход массив готовых пикселей

Форматы изображений

- `glTexImage2D` ожидает на вход массив готовых пикселей
- Обычно изображения хранятся в более сложных форматах: PNG, JPG, и т.д.

Форматы изображений

- `glTexImage2D` ожидает на вход массив готовых пикселей
- Обычно изображения хранятся в более сложных форматах: PNG, JPG, и т.д.
- Есть формат Netpbm, хранящий сырые пиксели и простой для чтения/записи

Форматы изображений

- `glTexImage2D` ожидает на вход массив готовых пикселей
- Обычно изображения хранятся в более сложных форматах: PNG, JPG, и т.д.
- Есть формат Netpbm, хранящий сырые пиксели и простой для чтения/записи
- Есть библиотеки для чтения разных форматов - libpng, libjpeg

Форматы изображений

- `glTexImage2D` ожидает на вход массив готовых пикселей
- Обычно изображения хранятся в более сложных форматах: PNG, JPG, и т.д.
- Есть формат Netpbm, хранящий сырые пиксели и простой для чтения/записи
- Есть библиотеки для чтения разных форматов - libpng, libjpeg
- `stb_image.h` - single-header библиотека для чтения разных форматов

Форматы изображений

- `glTexImage2D` ожидает на вход массив готовых пикселей
- Обычно изображения хранятся в более сложных форматах: PNG, JPG, и т.д.
- Есть формат Netpbm, хранящий сырые пиксели и простой для чтения/записи
- Есть библиотеки для чтения разных форматов - libpng, libjpeg
- `stb_image.h` - single-header библиотека для чтения разных форматов
- Boost GIL (Generic Image Library)

Псевдокод типичного использования текстуры

```
// инициализация
image = loadImage('image.png')
texture = createTexture()
texture.setMinFilter(GL_LINEAR_MIPMAP_NEAREST)
texture.setMagFilter(GL_NEAREST)
texture.load(image)
texture.generateMipmap()

// рендеринг
program.use()
vao.bind()
program.uniform("color_texture") = 0;
glActiveTexture(GL_TEXTURE0);
texture.bind()
glDrawArrays(...)
```

Ссылки

- khronos.org/opengl/wiki/Texture
- khronos.org/opengl/wiki/Sampler_Object
- khronos.org/opengl/wiki/Image_Format
- learnopengl.com/Getting-started/Textures
- opengl-tutorial.org/beginners-tutorials/tutorial-5-a-textured-cube
- open.gl/textures