Компьютерная графика

Лекция 3: Объекты OpenGL, буферы, аттрибуты вершин, индексированный рендеринг

2025

Объекты OpenGL

- Основные строительные блоки, через которые мы работаем с OpenGL

Объекты OpenGL

- Основные строительные блоки, через которые мы работаем с OpenGL
- Хранят настройки рендеринга, запоминают состояние

Объекты OpenGL

- Основные строительные блоки, через которые мы работаем с OpenGL
- Хранят настройки рендеринга, запоминают состояние
- Принадлежат текущему контексту OpenGL

Объекты OpenGL

- Основные строительные блоки, через которые мы работаем с OpenGL
- Хранят настройки рендеринга, запоминают состояние
- Принадлежат текущему контексту OpenGL
  - Часть объектов можно делить между разными контекстами, см. *OpenGL context sharing*

Примеры объектов OpenGL

- **Шейдеры, шейдерные программы** – программируемая часть конвейера

Примеры объектов OpenGL

- **Шейдеры, шейдерные программы** – программируемая часть конвейера
- **Буферы** – хранят данные на GPU

Примеры объектов OpenGL

- **Шейдеры, шейдерные программы** – программируемая часть конвейера
- **Буферы** – хранят данные на GPU
- **Vertex Array** – описывают формат и хранение вершин

Примеры объектов OpenGL

- **Шейдеры, шейдерные программы** – программируемая часть конвейера
- **Буферы** – хранят данные на GPU
- **Vertex Array** – описывают формат и хранение вершин
- **Текстуры** – изображения в памяти GPU, которые можно читать из шейдера, и в которые можно рисовать

Примеры объектов OpenGL

- **Шейдеры, шейдерные программы** – программируемая часть конвейера
- **Буферы** – хранят данные на GPU
- **Vertex Array** – описывают формат и хранение вершин
- **Текстуры** – изображения в памяти GPU, которые можно читать из шейдера, и в которые можно рисовать
- **Renderbuffer** – буферы, в которые можно рисовать

Примеры объектов OpenGL

- **Шейдеры, шейдерные программы** – программируемая часть конвейера
- **Буферы** – хранят данные на GPU
- **Vertex Array** – описывают формат и хранение вершин
- **Текстуры** – изображения в памяти GPU, которые можно читать из шейдера, и в которые можно рисовать
- **Renderbuffer** – буферы, в которые можно рисовать
- **Framebuffer** – содержит настройки рисования в текстуры и renderbuffer'ы

Примеры объектов OpenGL

- **Шейдеры, шейдерные программы** – программируемая часть конвейера
- **Буферы** – хранят данные на GPU
- **Vertex Array** – описывают формат и хранение вершин
- **Текстуры** – изображения в памяти GPU, которые можно читать из шейдера, и в которые можно рисовать
- **Renderbuffer** – буферы, в которые можно рисовать
- **Framebuffer** – содержит настройки рисования в текстуры и renderbuffer'ы
- И другие

Создание/удаление объектов OpenGL

- В коде объект представляется идентификатором типа `GLuint`
  - Id уникален среди объектов одного типа (шейдеры, программы, ...)

Создание/удаление объектов OpenGL

- В коде объект представляется идентификатором типа `GLuint`
  - Id уникален среди объектов одного типа (шейдеры, программы, ...)
- Шейдеры и программы:
  - `glCreateShader () / glDeleteShader (shader)`
  - `glCreateProgram() / glDeleteProgram(program)`

Создание/удаление объектов OpenGL

- В коде объект представляется идентификатором типа `GLuint`
  - Id уникален среди объектов одного типа (шейдеры, программы, ...)
- Шейдеры и программы:
  - `glCreateShader () / glDeleteShader (shader)`
  - `glCreateProgram() / glDeleteProgram(program)`
- Остальные объекты:
  - `glGenBuffers(count, ptr) / glDeleteBuffers(count, ptr)`
  - `glGenVertexArrays / glDeleteVertexArrays`
  - `glGenTextures / glDeleteTextures`
  - `glGenRenderbuffers / glDeleteRenderbuffers`
  - `glGenFramebuffers / glDeleteFramebuffers`

Создание/удаление объектов OpenGL

- Можно создать/удалить один объект:

```
GLuint texture;
glGenTextures(1, &texture);
...
glDeleteTexture(1, &texture);
```

Объекты OpenGL

- Подразумевается, что объекты переиспользуются по максимуму
- Не нужно создавать новую текстуру каждый кадр – создайте один раз и переиспользуйте её
- Не нужно создавать новый буфер при каждом обновлении данных – создайте один раз и переиспользуйте его

Объекты OpenGL с нулевым id

- Как правило, объект с нулевым id считается несуществующим (как нулевой указатель)

Объекты OpenGL с нулевым id

- Как правило, объект с нулевым id считается несуществующим (как нулевой указатель)
- Исключения:
  - **Framebuffer** с нулевым id – *default framebuffer*, рисует в окно, привязанное к контексту OpenGL, его *нельзя настраивать*

Объекты OpenGL с нулевым id

- Как правило, объект с нулевым id считается несуществующим (как нулевой указатель)
- Исключения:
  - **Framebuffer** с нулевым id – *default framebuffer*, рисует в окно, привязанное к контексту OpenGL, его *нельзя настраивать*
  - В **OpenGL ES**: **vertex array** с нулевым id – ничем не отличается от других vertex array'ев, но существует (создан) по умолчанию

Объекты OpenGL с нулевым id

- Как правило, объект с нулевым id считается несуществующим (как нулевой указатель)
- Исключения:
  - **Framebuffer** с нулевым id – *default framebuffer*, рисует в окно, привязанное к контексту OpenGL, его *нельзя настраивать*
  - В **OpenGL ES**: **vertex array** с нулевым id – ничем не отличается от других vertex array'ев, но существует (создан) по умолчанию
- Функции создания объектов *никогда* не возвращают нулевой id
- Функции удаления объектов *игнорируют* нулевой id (т.е. удалить нулевой объект – не ошибка)

Объекты OpenGL с нулевым id

- Как правило, объект с нулевым id считается несуществующим (как нулевой указатель)
- Исключения:
  - **Framebuffer** с нулевым id – *default framebuffer*, рисует в окно, привязанное к контексту OpenGL, его *нельзя настраивать*
  - В **OpenGL ES**: **vertex array** с нулевым id – ничем не отличается от других vertex array'ев, но существует (создан) по умолчанию
- Функции создания объектов *никогда* не возвращают нулевой id
- Функции удаления объектов *игнорируют* нулевой id (т.е. удалить нулевой объект – не ошибка)
- Нулевой id можно использовать как маркер отсутствия объекта

Удаление объектов

- По-хорошему, объекты нужно удалять, когда они перестают быть нужны (все движки и серьёзные обёртки над OpenGL это делают)

Удаление объектов

- По-хорошему, объекты нужно удалять, когда они перестают быть нужны (все движки и серьёзные обёртки над OpenGL это делают)
- На практике, они удаляются автоматически в конце работы программы (при удалении контекста OpenGL), и мы будем этим пользоваться в течение курса

Работа с объектами OpenGL

- Почти всегда чтобы работать с объектом, нужно сделать его ‘текущим’
  - Текущий объект запоминается в контексте OpenGL
  - Если вы работаете с одним контекстом, можно считать, что id текущего объекта – глобальная константа

Работа с объектами OpenGL

- Почти всегда чтобы работать с объектом, нужно сделать его ‘текущим’
  - Текущий объект запоминается в контексте OpenGL
  - Если вы работаете с одним контекстом, можно считать, что id текущего объекта – глобальная константа
- Некоторые функции не требуют выставления объекта текущим, а принимают объект напрямую: `glShaderSource`, `glCompileShader`, `glLinkProgram`, `glGetUniformLocation`, ...

Работа с объектами OpenGL

- Почти всегда чтобы работать с объектом, нужно сделать его ‘текущим’
  - Текущий объект запоминается в контексте OpenGL
  - Если вы работаете с одним контекстом, можно считать, что id текущего объекта – глобальная константа
- Некоторые функции не требуют выставления объекта текущим, а принимают объект напрямую: `glShaderSource`, `glCompileShader`, `glLinkProgram`, `glGetUniformLocation`, ...
- Некоторые объекты нельзя сделать текущими: шейдеры

Текущий объект

- Сделать программу текущей: `glUseProgram(program)`
  - Функции `glUniform1f`, ... работают с *текущей программой*

Текущий объект

- Сделать программу текущей: `glUseProgram(program)`
  - Функции `glUniform1f`, ... работают с *текущей программой*
- Сделать vertex array текущим: `glBindVertexArray(vao)`
  - Функции работы с vertex array используют *текущий vertex array*

Текущий объект

- Сделать программу текущей: `glUseProgram(program)`
  - Функции `glUniform1f`, ... работают с *текущей программой*
- Сделать vertex array текущим: `glBindVertexArray(vao)`
  - Функции работы с vertex array используют *текущий vertex array*
- Функции рисования (`glDrawArrays` и др.) используют *текущую шейдерную программу* и *текущий vertex array*

Текущий объект

- Сделать текущим буфер, текстуру, и т.д.:
  - `glBindBuffer      (target, id)`
  - `glBindTexture     (target, id)`
  - `glBindRenderbuffer(target, id)`
  - `glBindFramebuffer (target, id)`

Текущий объект

- Сделать текущим буфер, текстуру, и т.д.:
  - `glBindBuffer      (target, id)`
  - `glBindTexture     (target, id)`
  - `glBindRenderbuffer(target, id)`
  - `glBindFramebuffer (target, id)`
- Что такое `target`?

Текущий объект: target

- Для большинства видов объектов (буферы, текстуры, ...) есть отдельный набор возможных значений `target`

Текущий объект: target

- Для большинства видов объектов (буферы, текстуры, ...) есть отдельный набор возможных значений `target`
- Для таких объектов нет одного глобального текущего объекта, но есть текущий объект для каждого конкретного значения `target`

Текущий объект: target

- Для большинства видов объектов (буферы, текстуры, ...) есть отдельный набор возможных значений `target`
- Для таких объектов нет одного глобального текущего объекта, но есть текущий объект для каждого конкретного значения `target`
- Можно считать, что есть глобальный словарь target $\to$ id текущих объектов (отдельный для буферов, текстур, и т.д.)

Текущий объект: target

- Для большинства видов объектов (буферы, текстуры, ...) есть отдельный набор возможных значений `target`
- Для таких объектов нет одного глобального текущего объекта, но есть текущий объект для каждого конкретного значения `target`
- Можно считать, что есть глобальный словарь target $\rightarrow$ id текущих объектов (отдельный для буферов, текстур, и т.д.)
- Смысл и особенности разных значений `target` зависят от типа объекта

Буферы

- Могут хранить произвольные данные на GPU

Буферы

- Могут хранить произвольные данные на GPU
- `glGenBuffers / glDeleteBuffers`

Буферы

- Могут хранить произвольные данные на GPU
- `glGenBuffers / glDeleteBuffers`
- Возможные значения `target` для `glBindBuffer`:
  - `GL_ARRAY_BUFFER` (VBO) – массив вершин

Буферы

- Могут хранить произвольные данные на GPU
- `glGenBuffers / glDeleteBuffers`
- Возможные значения `target` для `glBindBuffer`:
  - `GL_ARRAY_BUFFER` (VBO) – массив вершин
  - `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER` (EBO/IBO) – массив индексов вершин

Буферы

- Могут хранить произвольные данные на GPU
- `glGenBuffers / glDeleteBuffers`
- Возможные значения `target` для `glBindBuffer`:
  - `GL_ARRAY_BUFFER` (VBO) – массив вершин
  - `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER` (EBO/IBO) – массив индексов вершин
  - `GL_UNIFORM_BUFFER` (UBO) – массив для uniform-блоков

Буферы

- Могут хранить произвольные данные на GPU
- `glGenBuffers / glDeleteBuffers`
- Возможные значения `target` для `glBindBuffer`:
  - `GL_ARRAY_BUFFER` (VBO) – массив вершин
  - `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER` (EBO/IBO) – массив индексов вершин
  - `GL_UNIFORM_BUFFER` (UBO) – массив для uniform-блоков
  - ...и другие

Буферы

- Могут хранить произвольные данные на GPU
- `glGenBuffers / glDeleteBuffers`
- Возможные значения `target` для `glBindBuffer`:
  - `GL_ARRAY_BUFFER` (VBO) – массив вершин
  - `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER` (EBO/IBO) – массив индексов вершин
  - `GL_UNIFORM_BUFFER` (UBO) – массив для uniform-блоков
  - ...и другие
- Один и тот же буфер *можно* использовать с разными значениями `target`

Буферы

- Могут хранить произвольные данные на GPU
- `glGenBuffers / glDeleteBuffers`
- Возможные значения `target` для `glBindBuffer`:
  - `GL_ARRAY_BUFFER` (VBO) – массив вершин
  - `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER` (EBO/IBO) – массив индексов вершин
  - `GL_UNIFORM_BUFFER` (UBO) – массив для uniform-блоков
  - ...и другие
- Один и тот же буфер *можно* использовать с разными значениями `target`
- Текущий `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER` хранится не глобально, а **в текущем VAO!**

Буферы: запись данных

- Выделить память на GPU и загрузить данные:

```
glBufferData(GLenum target, GLsizeiptr size,
    const GLvoid * data, GLenum usage)
```

Буферы: запись данных

- Выделить память на GPU и загрузить данные:

```
glBufferData(GLenum target, GLsizeiptr size,
    const GLvoid * data, GLenum usage)
```

  - `target` – `GL_ARRAY_BUFFER` и т.п.
  - `size` – размер данных в байтах
  - `data` – указатель на данные
  - `usage` – подсказка драйверу о том, как данные будут использоваться

Буферы: запись данных

- Выделить память на GPU и загрузить данные:

```
glBufferData(GLenum target, GLsizeiptr size,
    const GLvoid * data, GLenum usage)
```

  - `target` – `GL_ARRAY_BUFFER` и т.п.
  - `size` – размер данных в байтах
  - `data` – указатель на данные
  - `usage` – подсказка драйверу о том, как данные будут использоваться
- Если `data = nullptr`, буфер будет выделен, но данные будут не инициализированы

Буферы: запись данных

- Выделить память на GPU и загрузить данные:

```
glBufferData(GLenum target, GLsizeiptr size,
    const GLvoid * data, GLenum usage)
```

  - `target` – `GL_ARRAY_BUFFER` и т.п.
  - `size` – размер данных в байтах
  - `data` – указатель на данные
  - `usage` – подсказка драйверу о том, как данные будут использоваться
- Если `data = nullptr`, буфер будет выделен, но данные будут не инициализированы
- Если буфер уже содержал данные, они заменяются новыми (и происходит реаллокация памяти)

Буферы: запись данных

- `target` буфера нужен для взаимодействия с другими объектами OpenGL; при загрузке данных в буфер этот параметр не очень важен и используется только чтобы обратиться к *текущему буферу*

Буферы: запись данных

- После вызова `glBufferData` с данными по указателю `data` можно делать всё, что угодно (в т.ч. удалить)

Буферы: запись данных

- После вызова `glBufferData` с данными по указателю `data` можно делать всё, что угодно (в т.ч. удалить)
- Копирование данных в память GPU тоже происходит асинхронно

Буферы: запись данных

- После вызова `glBufferData` с данными по указателю `data` можно делать всё, что угодно (в т.ч. удалить)
- Копирование данных в память GPU тоже происходит асинхронно
- $\Longrightarrow$ Драйвер, скорее всего, сначала копирует данные в собственную память, а потом инициирует отложенную загрузку на GPU

Буферы: параметр usage

`GL_STATIC_DRAW`	`GL_STATIC_READ`	`GL_STATIC_COPY`
`GL_DYNAMIC_DRAW`	`GL_DYNAMIC_READ`	`GL_DYNAMIC_COPY`
`GL_STREAM_DRAW`	`GL_STREAM_READ`	`GL_STREAM_COPY`

Буферы: параметр usage

`GL_STATIC_DRAW`	`GL_STATIC_READ`	`GL_STATIC_COPY`
`GL_DYNAMIC_DRAW`	`GL_DYNAMIC_READ`	`GL_DYNAMIC_COPY`
`GL_STREAM_DRAW`	`GL_STREAM_READ`	`GL_STREAM_COPY`

- Данные будут обновляться
  - `STATIC` – один раз
  - `DYNAMIC` – иногда
  - `STREAM` – почти каждый кадр

Буферы: параметр usage

`GL_STATIC_DRAW`	`GL_STATIC_READ`	`GL_STATIC_COPY`
`GL_DYNAMIC_DRAW`	`GL_DYNAMIC_READ`	`GL_DYNAMIC_COPY`
`GL_STREAM_DRAW`	`GL_STREAM_READ`	`GL_STREAM_COPY`

- Данные будут обновляться
  - `STATIC` – один раз
  - `DYNAMIC` – иногда
  - `STREAM` – почти каждый кадр
- Буфер будет использоваться для:
  - `DRAW` – записи данных в него
  - `READ` – чтения данных из него
  - `COPY` – и записи, и чтения

Буферы: параметр usage

`GL_STATIC_DRAW`	`GL_STATIC_READ`	`GL_STATIC_COPY`
`GL_DYNAMIC_DRAW`	`GL_DYNAMIC_READ`	`GL_DYNAMIC_COPY`
`GL_STREAM_DRAW`	`GL_STREAM_READ`	`GL_STREAM_COPY`

- Данные будут обновляться
  - `STATIC` – один раз
  - `DYNAMIC` – иногда
  - `STREAM` – почти каждый кадр
- Буфер будет использоваться для:
  - `DRAW` – записи данных в него
  - `READ` – чтения данных из него
  - `COPY` – и записи, и чтения
- Это только *подсказка* драйверу и не влияет на корректность работы

Буферы: запись и чтение данных

- Загрузить данные в часть буфера:

```
glBufferSubData(GLenum target, GLintptr offset,
    GLsizeiptr size, const GLvoid * data)
```

Буферы: запись и чтение данных

- Загрузить данные в часть буфера:

```
glBufferSubData(GLenum target, GLintptr offset,
    GLsizeiptr size, const GLvoid * data)
```

  - Гарантированно не реаллоцирует память GPU
  - Память уже должна быть выделена с помощью `glBufferData`

Буферы: запись и чтение данных

- Загрузить данные в часть буфера:

```
glBufferSubData(GLenum target, GLintptr offset,
    GLsizeiptr size, const GLvoid * data)
```

  - Гарантированно не реаллоцирует память GPU
    - Память уже должна быть выделена с помощью `glBufferData`

- Прочитать данные из буфера:

```
glGetBufferSubData(GLenum target, GLintptr offset,
    GLsizeiptr size, GLvoid * data)
```

Буферы: запись и чтение данных

- Загрузить данные в часть буфера:

```
glBufferSubData(GLenum target, GLintptr offset,
    GLsizeiptr size, const GLvoid * data)
```

  - Гарантированно не реаллоцирует память GPU
  - Память уже должна быть выделена с помощью `glBufferData`

- Прочитать данные из буфера:

```
glGetBufferSubData(GLenum target, GLintptr offset,
    GLsizeiptr size, GLvoid * data)
```

  - К моменту выхода из этой функции данные уже прочитаны
  - $\Rightarrow$ Синхронная функция, **блокирующая исполнение**

Mapped buffer

- Можно получить виртуальный указатель на буфер или его часть и пользоваться им для чтения/записи

Mapped buffer

- Можно получить виртуальный указатель на буфер или его часть и пользоваться им для чтения/записи
- `glMapBuffer(target, access)` – возвращает особый *mapped* указатель
- `access` может принимать значения
  - `GL_READ_ONLY` – по указателю можно читать
  - `GL_WRITE_ONLY` – по указателю можно писать
  - `GL_READ_WRITE` – по указателю можно читать и писать

Mapped buffer

- Можно получить виртуальный указатель на буфер или его часть и пользоваться им для чтения/записи
- `glMapBuffer(target, access)` – возвращает особый *mapped* указатель
- `access` может принимать значения
  - `GL_READ_ONLY` – по указателю можно читать
  - `GL_WRITE_ONLY` – по указателю можно писать
  - `GL_READ_WRITE` – по указателю можно читать и писать
- `glUnmapBuffer(target)`

Mapped buffer

- Можно получить виртуальный указатель на буфер или его часть и пользоваться им для чтения/записи
- `glMapBuffer(target, access)` – возвращает особый *mapped* указатель
- `access` может принимать значения
  - `GL_READ_ONLY` – по указателю можно читать
  - `GL_WRITE_ONLY` – по указателю можно писать
  - `GL_READ_WRITE` – по указателю можно читать и писать
- `glUnmapBuffer(target)`
- Между `glMapBuffer` и `glUnmapBuffer` работать с буфером (загружать данные другими методами, использовать данные для рисования) нельзя

Mapped buffer

- Можно получить виртуальный указатель на буфер или его часть и пользоваться им для чтения/записи
- `glMapBuffer(target, access)` – возвращает особый *mapped* указатель
- `access` может принимать значения
  - `GL_READ_ONLY` – по указателю можно читать
  - `GL_WRITE_ONLY` – по указателю можно писать
  - `GL_READ_WRITE` – по указателю можно читать и писать
- `glUnmapBuffer(target)`
- Между `glMapBuffer` и `glUnmapBuffer` работать с буфером (загружать данные другими методами, использовать данные для рисования) нельзя
- После `glUnmapBuffer` mapped указатель использовать нельзя

Mapped buffer

- Можно получить виртуальный указатель на буфер или его часть и пользоваться им для чтения/записи
- `glMapBuffer(target, access)` – возвращает особый *mapped* указатель
- `access` может принимать значения
  - `GL_READ_ONLY` – по указателю можно читать
  - `GL_WRITE_ONLY` – по указателю можно писать
  - `GL_READ_WRITE` – по указателю можно читать и писать
- `glUnmapBuffer(target)`
- Между `glMapBuffer` и `glUnmapBuffer` работать с буфером (загружать данные другими методами, использовать данные для рисования) нельзя
- После `glUnmapBuffer` mapped указатель использовать нельзя
- `glUnmapBuffer` может вернуть `GL_FALSE` по зависящим от системы причинам, и память буфера при этом остаётся непроинициализированной

Буферы: типичный пример использования

```
GLuint vbo;
glGenBuffers(1, &vbo);

std::vector<vertex> vertices;
...

glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vbo);
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER,
    vertices.size() * sizeof(vertices[0]),
    vertices.data(), GL_STATIC_DRAW);
```

Буферы: ссылки

- khronos.org/opengl/wiki/Buffer_Object
- songho.ca/opengl/gl_vbo.html

Атрибуты вершин

- Вершины – основные входные данные графического конвейера

Атрибуты вершин

- Вершины – основные входные данные графического конвейера
- С точки зрения OpenGL, вершины характеризуются набором *атрибутов*: позиция, цвет, нормаль, текстурные координаты, и т.п.

Атрибуты вершин

- Вершины – основные входные данные графического конвейера
- С точки зрения OpenGL, вершины характеризуются набором *атрибутов*: позиция, цвет, нормаль, текстурные координаты, и т.п.
- Каждый атрибут имеет свой тип и размерность

Атрибуты вершин

- Вершины – основные входные данные графического конвейера
- С точки зрения OpenGL, вершины характеризуются набором *атрибутов*: позиция, цвет, нормаль, текстурные координаты, и т.п.
- Каждый атрибут имеет свой тип и размерность
- Все вершины в рамках одного вызова команды рисования (`glDrawArrays` и др.) имеет один набор атрибутов

Атрибуты вершин

- Вершины – основные входные данные графического конвейера
- С точки зрения OpenGL, вершины характеризуются набором *атрибутов*: позиция, цвет, нормаль, текстурные координаты, и т.п.
- Каждый атрибут имеет свой тип и размерность
- Все вершины в рамках одного вызова команды рисования (`glDrawArrays` и др.) имеет один набор атрибутов
- Все настройки атрибутов конкретного набора вершин хранятся в VAO

Атрибуты вершин: шейдер

```
#version 330 core

//              index     type  name
layout (location = 0) in vec3 position;
layout (location = 1) in vec3 normal;
layout (location = 2) in vec4 color;
layout (location = 3) in uint materialID;

void main() {
    ...
}
```

Атрибуты вершин

- Индекс: `0, 1, ... glGet(GL_MAX_VERTEX_ATTRIBS) - 1`
  - `glGet(GL_MAX_VERTEX_ATTRIBS)` ≥ 16

Атрибуты вершин

- Индекс: `0, 1, ... glGet(GL_MAX_VERTEX_ATTRIBS) - 1`
  - `glGet(GL_MAX_VERTEX_ATTRIBS)` ≥ 16
- Включен/выключен
  - `glEnableVertexAttribArray(index)` – включить аттрибут
  - Выключены по умолчанию
  - Состояние включенности хранится в **vertex array**

Атрибуты вершин

- Индекс: `0, 1, ... glGet(GL_MAX_VERTEX_ATTRIBS) - 1`
  - `glGet(GL_MAX_VERTEX_ATTRIBS)` ≥ 16
- Включен/выключен
  - `glEnableVertexAttribArray(index)` – включить аттрибут
  - Выключены по умолчанию
  - Состояние включенности хранится в **vertex array**
- Если у вершины есть атрибут, не соответствующий атрибуту в шейдере, он просто игнорируется

Атрибуты вершин

- Индекс: `0, 1, ... glGet(GL_MAX_VERTEX_ATTRIBS) - 1`
  - `glGet(GL_MAX_VERTEX_ATTRIBS)` ≥ 16
- Включен/выключен
  - `glEnableVertexAttribArray(index)` – включить аттрибут
  - Выключены по умолчанию
  - Состояние включенности хранится в **vertex array**
- Если у вершины есть атрибут, не соответствующий атрибуту в шейдере, он просто игнорируется
- Если в шейдере есть атрибут, не соответствующий атрибуту у вершин, он принимает значение по умолчанию:
  - `float: 0.0`
  - `vec2: 0.0, 0.0`
  - `vec3: 0.0, 0.0, 0.0`
  - `vec4: 0.0, 0.0, 0.0, 1.0`

Атрибуты вершин: хранение

Параметры хранения данных атрибута:

Атрибуты вершин: хранение

Параметры хранения данных атрибута:

- Формат:
  - Количество компонент – 1, 2, 3, 4

Атрибуты вершин: хранение

Параметры хранения данных атрибута:

- Формат:
  - Количество компонент – 1, 2, 3, 4
  - Тип – `GL_BYTE`, `GL_UNSIGNED_BYTE`, `GL_SHORT`, `GL_UNSIGNED_SHORT`, `GL_INT`, `GL_UNSIGNED_INT`, `GL_HALF_FLOAT`, `GL_FLOAT`, `GL_DOUBLE`, `GL_INT_2_10_10_10_REV`, `GL_UNSIGNED_INT_2_10_10_10_REV`

Атрибуты вершин: хранение

Параметры хранения данных атрибута:

- Формат:
  - Количество компонент – 1, 2, 3, 4
  - Тип – `GL_BYTE`, `GL_UNSIGNED_BYTE`, `GL_SHORT`, `GL_UNSIGNED_SHORT`, `GL_INT`, `GL_UNSIGNED_INT`, `GL_HALF_FLOAT`, `GL_FLOAT`, `GL_DOUBLE`, `GL_INT_2_10_10_10_REV`, `GL_UNSIGNED_INT_2_10_10_10_REV`
  - Нормированный / не нормированный

Атрибуты вершин: хранение

Параметры хранения данных атрибута:

- Формат:
  - Количество компонент – 1, 2, 3, 4
  - Тип – `GL_BYTE`, `GL_UNSIGNED_BYTE`, `GL_SHORT`, `GL_UNSIGNED_SHORT`, `GL_INT`, `GL_UNSIGNED_INT`, `GL_HALF_FLOAT`, `GL_FLOAT`, `GL_DOUBLE`, `GL_INT_2_10_10_10_REV`, `GL_UNSIGNED_INT_2_10_10_10_REV`
  - Нормированный / не нормированный
- Расположение данных:
  - Адрес начала данных (на GPU)
  - Расстояние (в байтах) между значениями этого атрибута, соответствующими соседним вершинам

Атрибуты вершин: хранение

Параметры хранения данных атрибута:

- Формат:
  - Количество компонент – 1, 2, 3, 4
  - Тип – `GL_BYTE`, `GL_UNSIGNED_BYTE`, `GL_SHORT`, `GL_UNSIGNED_SHORT`, `GL_INT`, `GL_UNSIGNED_INT`, `GL_HALF_FLOAT`, `GL_FLOAT`, `GL_DOUBLE`, `GL_INT_2_10_10_10_REV`, `GL_UNSIGNED_INT_2_10_10_10_REV`
  - Нормированный / не нормированный
- Расположение данных:
  - Адрес начала данных (на GPU)
  - Расстояние (в байтах) между значениями этого атрибута, соответствующими соседним вершинам
- Всё это запоминается в **vertex array**

Атрибуты вершин: нормированность

- Как интерпретировать значение атрибута, который в шейдере объявлен как floating-point (`float`, `vec3`, и т.п.), но в данных он хранится как целочисленный?

Атрибуты вершин: нормированность

- Как интерпретировать значение атрибута, который в шейдере объявлен как floating-point (`float`, `vec3`, и т.п.), но в данных он хранится как целочисленный?
- 2 варианта:
  - **Не нормированный**: передавать, как есть, делая преобразование `int -> float`

Атрибуты вершин: нормированность

- Как интерпретировать значение атрибута, который в шейдере объявлен как floating-point (`float`, `vec3`, и т.п.), но в данных он хранится как целочисленный?
- 2 варианта:
  - **Не нормированный**: передавать, как есть, делая преобразование `int -> float`
  - **Нормированный**: преобразовывать диапазон целочисленных значений в $[-1, 1]$ (для знаковых) или $[0, 1]$ (для беззнаковых)

    ```
    unsigned short: x -> x / 65535
    short: x -> (2 x + 1) / 65535
    ```

Атрибуты вершин: нормированность

- Как интерпретировать значение атрибута, который в шейдере объявлен как floating-point (`float`, `vec3`, и т.п.), но в данных он хранится как целочисленный?
- 2 варианта:
  - **Не нормированный**: передавать, как есть, делая преобразование `int -> float`
  - **Нормированный**: преобразовывать диапазон целочисленных значений в $[-1, 1]$ (для знаковых) или $[0, 1]$ (для беззнаковых)

    ```
    unsigned short: x -> x / 65535
    short: x -> (2 x + 1) / 65535
    ```
- Полезно для передачи цвета: `0 .. 255` превращаются в стандартные для OpenGL `0.0 .. 1.0`

Атрибуты вершин: нормированность

- Как интерпретировать значение атрибута, который в шейдере объявлен как floating-point (`float`, `vec3`, и т.п.), но в данных он хранится как целочисленный?
- 2 варианта:
  - **Не нормированный**: передавать, как есть, делая преобразование `int -> float`
  - **Нормированный**: преобразовывать диапазон целочисленных значений в $[-1, 1]$ (для знаковых) или $[0, 1]$ (для беззнаковых)

    ```
    unsigned short: x -> x / 65535
    short: x -> (2 x + 1) / 65535
    ```
- Полезно для передачи цвета: `0 .. 255` превращаются в стандартные для OpenGL `0.0 .. 1.0`
- Полезно для компактного хранения атрибутов (например, нормалей)

Атрибуты вершин: нормированность

- Как интерпретировать значение атрибута, который в шейдере объявлен как floating-point (`float`, `vec3`, и т.п.), но в данных он хранится как целочисленный?
- 2 варианта:
  - **Не нормированный**: передавать, как есть, делая преобразование `int -> float`
  - **Нормированный**: преобразовывать диапазон целочисленных значений в $[-1, 1]$ (для знаковых) или $[0, 1]$ (для беззнаковых)

    ```
    unsigned short: x -> x / 65535
    short: x -> (2 x + 1) / 65535
    ```
- Полезно для передачи цвета: `0 .. 255` превращаются в стандартные для OpenGL `0.0 .. 1.0`
- Полезно для компактного хранения атрибутов (например, нормалей)
- Имеет смысл *только* для floating-point аттрибутов

Атрибуты вершин

- Перед настройкой конкретного атрибута нужно сделать текущим VAO, который вы хотите настроить

Атрибуты вершин

- Перед настройкой конкретного атрибута нужно сделать текущим VAO, который вы хотите настроить
- Если атрибут объявлен в шейдере как floating-point (`vec3` и т.п.), нужно использовать функцию `glVertexAttribPointer`, но храниться он *может* как целочисленный

Атрибуты вершин

- Перед настройкой конкретного атрибута нужно сделать текущим VAO, который вы хотите настроить
- Если атрибут объявлен в шейдере как floating-point (`vec3` и т.п.), нужно использовать функцию `glVertexAttribPointer`, но храниться он *может* как целочисленный
- Если атрибут объявлен в шейдере как целочисленный (`ivec3`,`uvec4` и т.п.), нужно использовать функцию `glVertexAttribIPointer`, и храниться он *должен* как целочисленный

Атрибуты вершин: floating-point

```
glVertexAttribPointer(GLuint index, GLint size,
    GLenum type, GLboolean normalized,
    GLsizei stride, const GLvoid * pointer)
```

Атрибуты вершин: floating-point

```
glVertexAttribPointer(GLuint index, GLint size,
    GLenum type, GLboolean normalized,
    GLsizei stride, const GLvoid * pointer)
```

- `index` – индекс аттрибута (`layout (location = index)` в шейдере)

Атрибуты вершин: floating-point

```
glVertexAttribPointer(GLuint index, GLint size,
    GLenum type, GLboolean normalized,
    GLsizei stride, const GLvoid * pointer)
```

- `index` – индекс аттрибута (`layout (location = index)` в шейдере)
- `size` – размерность (число компонент)

Атрибуты вершин: floating-point

```
glVertexAttribPointer(GLuint index, GLint size,
    GLenum type, GLboolean normalized,
    GLsizei stride, const GLvoid * pointer)
```

- `index` – индекс аттрибута (`layout (location = index)` в шейдере)
- `size` – размерность (число компонент)
- `type` – тип каждой компоненты

Атрибуты вершин: floating-point

```
glVertexAttribPointer(GLuint index, GLint size,
    GLenum type, GLboolean normalized,
    GLsizei stride, const GLvoid * pointer)
```

- `index` – индекс аттрибута (`layout (location = index)` в шейдере)
- `size` – размерность (число компонент)
- `type` – тип каждой компоненты
- `normalized` – нормированный или нет

Атрибуты вершин: floating-point

```
glVertexAttribPointer(GLuint index, GLint size,
    GLenum type, GLboolean normalized,
    GLsizei stride, const GLvoid * pointer)
```

- `index` – индекс аттрибута (`layout (location = index)` в шейдере)
- `size` – размерность (число компонент)
- `type` – тип каждой компоненты
- `normalized` – нормированный или нет
- `stride` – расстояние между соседними значениями (в байтах)

Атрибуты вершин: floating-point

```
glVertexAttribPointer(GLuint index, GLint size,
    GLenum type, GLboolean normalized,
    GLsizei stride, const GLvoid * pointer)
```

- `index` – индекс аттрибута (`layout (location = index)` в шейдере)
- `size` – размерность (число компонент)
- `type` – тип каждой компоненты
- `normalized` – нормированный или нет
- `stride` – расстояние между соседними значениями (в байтах)
- `pointer` – указатель на данные

Атрибуты вершин: floating-point

```
glVertexAttribPointer(GLuint index, GLint size,
    GLenum type, GLboolean normalized,
    GLsizei stride, const GLvoid * pointer)
```

- `index` – индекс аттрибута (`layout (location = index)` в шейдере)
- `size` – размерность (число компонент)
- `type` – тип каждой компоненты
- `normalized` – нормированный или нет
- `stride` – расстояние между соседними значениями (в байтах)
- `pointer` – указатель на данные
  - На самом деле, `pointer` – сдвиг в байтах относительно начала памяти текущего `GL_ARRAY_BUFFER`
  - Например, если данные этого атрибута начинаются на 12ом байте текущего `GL_ARRAY_BUFFER`, нужно передать `(void *)(12)`

Атрибуты вершин: floating-point

```
glVertexAttribPointer(GLuint index, GLint size,
    GLenum type, GLboolean normalized,
    GLsizei stride, const GLvoid * pointer)
```

- `index` – индекс аттрибута (`layout (location = index)` в шейдере)
- `size` – размерность (число компонент)
- `type` – тип каждой компоненты
- `normalized` – нормированный или нет
- `stride` – расстояние между соседними значениями (в байтах)
- `pointer` – указатель на данные
  - На самом деле, `pointer` – сдвиг в байтах относительно начала памяти текущего `GL_ARRAY_BUFFER`
  - Например, если данные этого атрибута начинаются на 12ом байте текущего `GL_ARRAY_BUFFER`, нужно передать `(void *)(12)`
  - Разные атрибуты могут лежать в разных буферах

Атрибуты вершин: целочисленные

```
glVertexAttribIPointer(GLuint index, GLint size,
    GLenum type,
    GLsizei stride, const GLvoid * pointer)
```

- Все то же самое, но
  - Нет параметра `normalized`
  - `type` может быть только целочисленным

Атрибуты вершин: stride

- Пусть `start` – смещение, указанное в параметре `pointer` функции `glVertexAttribPointer`

Атрибуты вершин: stride

- Пусть `start` – смещение, указанное в параметре `pointer` функции `glVertexAttribPointer`
- Тогда соответстующий аттрибут вершины с номером `i` будет взят по смещению `start + stride * i`

Атрибуты вершин: stride

- Пусть `start` – смещение, указанное в параметре `pointer` функции `glVertexAttribPointer`
- Тогда соответстующий аттрибут вершины с номером `i` будет взят по смещению `start + stride * i`
  - Нулевая вершина: `start`
  - Первая вершина: `start + stride`
  - Вторая вершина: `start + 2 * stride`
  - И т.д.

Атрибуты вершин: stride

- Пусть `start` – смещение, указанное в параметре `pointer` функции `glVertexAttribPointer`
- Тогда соответстующий аттрибут вершины с номером `i` будет взят по смещению `start + stride * i`
  - Нулевая вершина: `start`
  - Первая вершина: `start + stride`
  - Вторая вершина: `start + 2 * stride`
  - И т.д.
- Если `stride = 0`, `stride` считается равным размеру аттрибута `stride = size * sizeof(type)`

Атрибуты вершин: stride

- Пусть `start` – смещение, указанное в параметре `pointer` функции `glVertexAttribPointer`
- Тогда соответствующий аттрибут вершины с номером `i` будет взят по смещению `start + stride * i`
  - Нулевая вершина: `start`
  - Первая вершина: `start + stride`
  - Вторая вершина: `start + 2 * stride`
  - И т.д.
- Если `stride = 0`, `stride` считается равным размеру аттрибута `stride = size * sizeof(type)`
  - Например, для `size = 3` и `type = GL_UNSIGNED_INT`, `stride` будет вычислен как
    `stride = 3 * sizeof(unsigned int) = 3 * 4 = 12`

Атрибуты вершин: stride

- Пусть `start` – смещение, указанное в параметре `pointer` функции `glVertexAttribPointer`
- Тогда соответствующий аттрибут вершины с номером `i` будет взят по смещению `start + stride * i`
  - Нулевая вершина: `start`
  - Первая вершина: `start + stride`
  - Вторая вершина: `start + 2 * stride`
  - И т.д.
- Если `stride = 0`, `stride` считается равным размеру аттрибута `stride = size * sizeof(type)`
  - Например, для `size = 3` и `type = GL_UNSIGNED_INT`, `stride` будет вычислен как
    `stride = 3 * sizeof(unsigned int) = 3 * 4 = 12`
  - Можно использовать, если значения конкретного атрибута идут в памяти подряд, друг за другом, без пропусков

Атрибуты вершин: stride

- Пусть `start` – смещение, указанное в параметре `pointer` функции `glVertexAttribPointer`
- Тогда соответстующий аттрибут вершины с номером `i` будет взят по смещению `start + stride * i`
  - Нулевая вершина: `start`
  - Первая вершина: `start + stride`
  - Вторая вершина: `start + 2 * stride`
  - И т.д.
- Если `stride = 0`, `stride` считается равным размеру аттрибута `stride = size * sizeof(type)`
  - Например, для `size = 3` и `type = GL_UNSIGNED_INT`, `stride` будет вычислен как
    `stride = 3 * sizeof(unsigned int) = 3 * 4 = 12`
  - Можно использовать, если значения конкретного атрибута идут в памяти подряд, друг за другом, без пропусков
- Нужен для гибкости хранения аттрибутов

Атрибуты вершин: размерность

- Размерность атрибута, указанная в `glVertexAttribPointer` (т.е. реальное количество хранимых в памяти компонент), не обязана совпадать с размерностью, указанной в шейдере

Атрибуты вершин: размерность

- Размерность атрибута, указанная в `glVertexAttribPointer` (т.е. реальное количество хранимых в памяти компонент), не обязана совпадать с размерностью, указанной в шейдере
- Если компонент больше, чем надо, они отбрасываются

Атрибуты вершин: размерность

- Размерность атрибута, указанная в `glVertexAttribPointer` (т.е. реальное количество хранимых в памяти компонент), не обязана совпадать с размерностью, указанной в шейдере
- Если компонент больше, чем надо, они отбрасываются
- Если компонент меньше, чем надо, они дополняются нулём (первые 3 компоненты) или единицей (4ая компонента)

Атрибуты вершин: пример array-of-structs, один буфер

```
struct vertex {
    float position[3];
    float normal[3];
    unsigned char color[4];
};
vertex vertices[N];

glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vbo);
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, N * sizeof(vertices), vertices, GL_STATIC_DRAW);

glBindVertexArray(vao);

glEnableVertexAttribArray(0);
glVertexAttribPointer(0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, sizeof(vertex), (void*)(0));

glEnableVertexAttribArray(1);
glVertexAttribPointer(1, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, sizeof(vertex), (void*)(12));

glEnableVertexAttribArray(2);
glVertexAttribPointer(2, 4, GL_UNSIGNED_BYTE, GL_TRUE, sizeof(vertex), (void*)(24));
```

Аттрибуты вершин: пример struct-of-arrays, один буфер

```
float positions[3 * N];
float normals[3 * N];
unsigned char colors[4 * N];

glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vbo);
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, N * 28, nullptr, GL_STATIC_DRAW);
glBufferSubData(GL_ARRAY_BUFFER, 0, N * 12, positions);
glBufferSubData(GL_ARRAY_BUFFER, N * 12, N * 12, normals);
glBufferSubData(GL_ARRAY_BUFFER, N * 24, N * 4, colors);

glBindVertexArray(vao);

glEnableVertexAttribArray(0);
glVertexAttribPointer(0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 0, (void*)(0));

glEnableVertexAttribArray(1);
glVertexAttribPointer(1, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 0, (void*)(12 * N));

glEnableVertexAttribArray(2);
glVertexAttribPointer(2, 4, GL_UNSIGNED_BYTE, GL_TRUE, 0, (void*)(24 * N));
```

Аттрибуты вершин: пример struct-of-arrays, три буфера

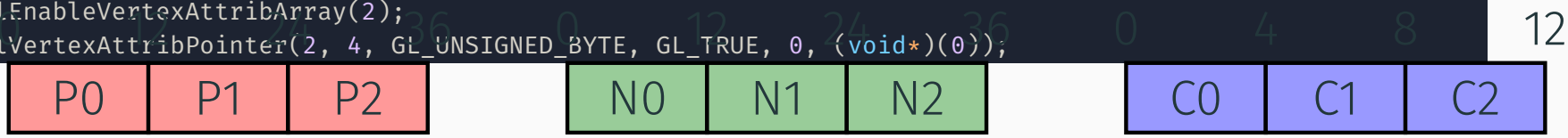
```
float positions[3 * N];
float normals[3 * N];
unsigned char colors[4 * N];

glBindVertexArray(vao);

glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, position_vbo);
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, 3 * N * sizeof(float), positions, GL_STATIC_DRAW);
glEnableVertexAttribArray(0);
glVertexAttribPointer(0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 0, (void*)(0));

glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, normal_vbo);
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, 3 * N * sizeof(float), normals, GL_STATIC_DRAW);
glEnableVertexAttribArray(1);
glVertexAttribPointer(1, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 0, (void*)(0));

glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, color_vbo);
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, 4 * N * sizeof(unsigned char), colors, GL_STATIC_DRAW);
glEnableVertexAttribArray(2);
glVertexAttribPointer(2, 4, GL_UNSIGNED_BYTE, GL_TRUE, 0, (void*)(0));
```



Аттрибуты вершин: как хранить?

- Если не можете выбрать, используйте array-of-structs (например, если вершины хранятся непрерывано в памяти, e.g. `std::vector<vertex>`)

Аттрибуты вершин: как хранить?

- Если не можете выбрать, используйте array-of-structs (например, если вершины хранятся непрерывано в памяти, e.g. `std::vector<vertex>`)
- Если часть аттрибутов постоянны, а другую часть нужно иногда обновлять – разделите эти части по двум разным VBO

Аттрибуты вершин: как хранить?

- Если не можете выбрать, используйте array-of-structs (например, если вершины хранятся непрерывано в памяти, e.g. `std::vector<vertex>`)
- Если часть аттрибутов постоянны, а другую часть нужно иногда обновлять – разделите эти части по двум разным VBO
- Некоторые форматы 3D сцен (напр. `glTF`) хранят вершины в бинарном формате, удобном для загрузки в OpenGL: поддерживают несколько буферов и разный `stride`

Аттрибуты вершин: пример полностью

```
// Инициализация:
program = createProgram()
vertices = createVertices()
vbo = createVBO(vertices)
vao = createVAO()
setupAttributes(vao, vbo) // glVertexAttribPointer, ...

// Рендеринг:
glUseProgram(program)
glBindVertexArray(vao)
glDrawArrays(GL_TRIANGLES, 0, count)
```

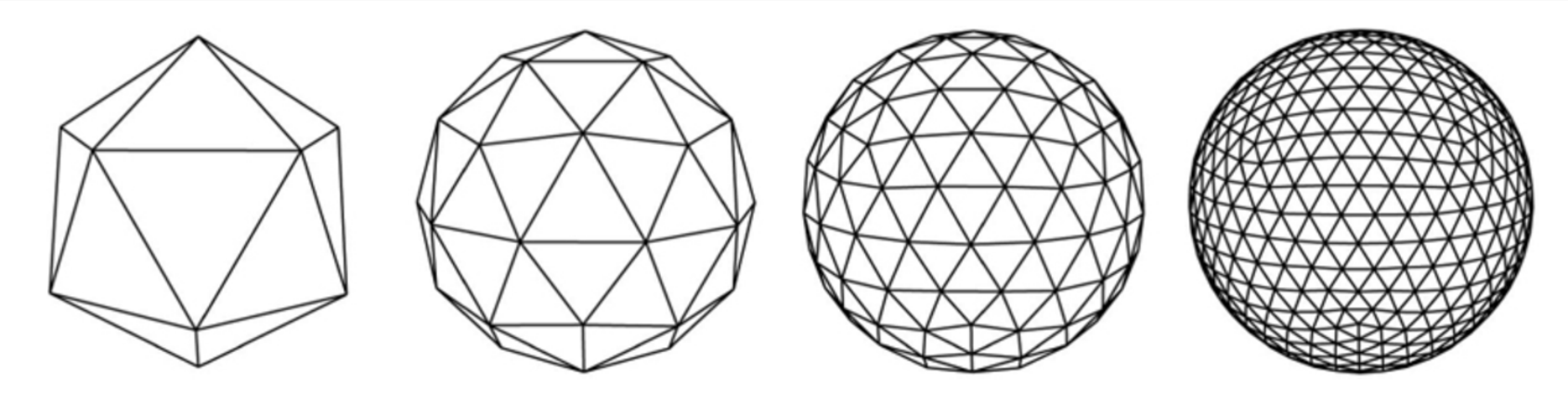
Аттрибуты вершин: пример полностью

```
// Инициализация:
program = createProgram()
vertices = createVertices()
vbo = createVBO(vertices)
vao = createVAO()
setupAttributes(vao, vbo) // glVertexAttribPointer, ...

// Рендеринг:
glUseProgram(program)
glBindVertexArray(vao)
glDrawArrays(GL_TRIANGLES, 0, count)
```

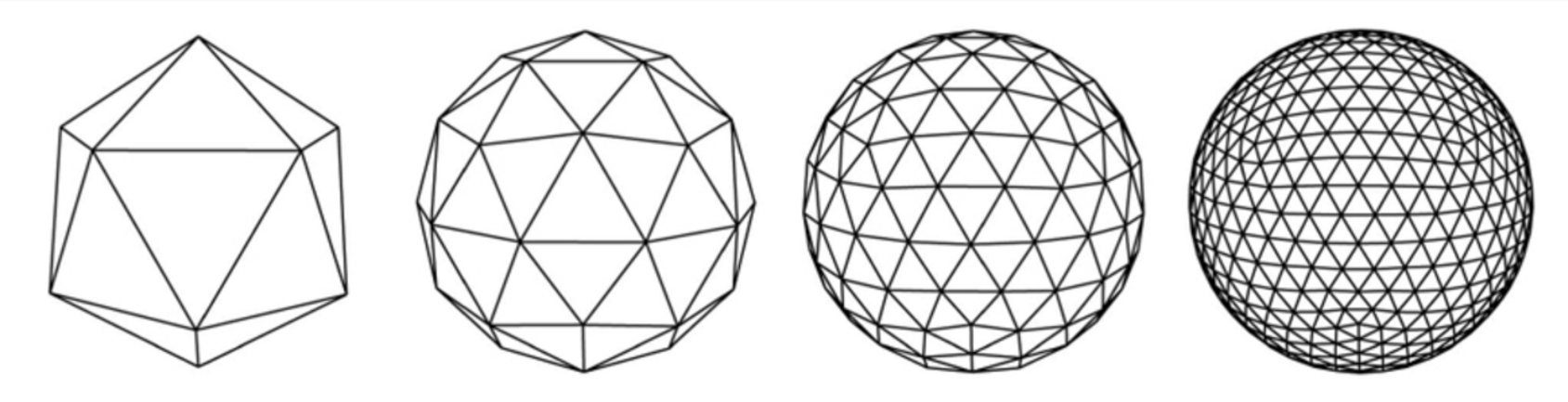
- khronos.org/opengl/wiki/Vertex_Specification

Индексированный рендеринг



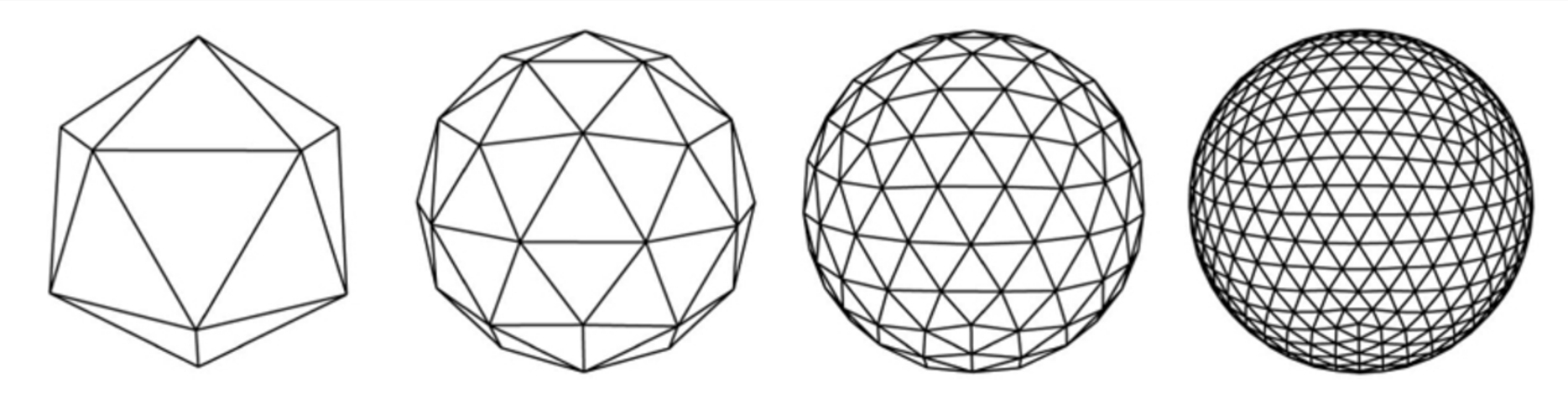
- В моделях одна вершина часто входит в несколько треугольников (в среднем, 6)

Индексированный рендеринг



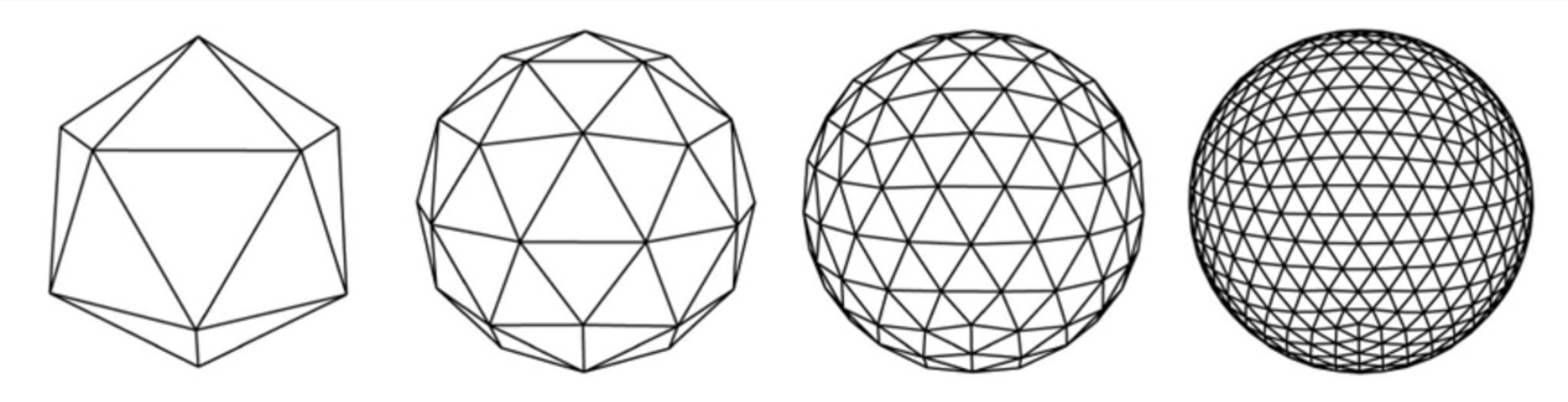
- В моделях одна вершина часто входит в несколько треугольников (в среднем, 6)
- Если использовать `GL_TRIANGLES`, придётся копировать каждую вершину несколько раз

Индексированный рендеринг



- В моделях одна вершина часто входит в несколько треугольников (в среднем, 6)
- Если использовать `GL_TRIANGLES`, придётся копировать каждую вершину несколько раз
- `GL_TRIANGLE_STRIP` и т.п. только частично решают проблему

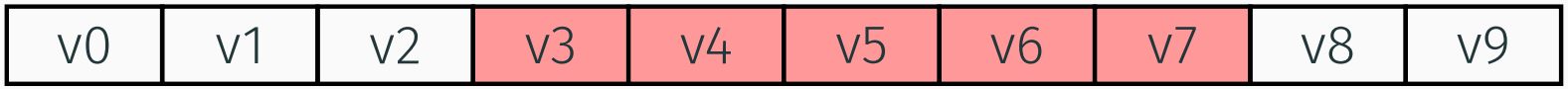
Индексированный рендеринг



- В моделях одна вершина часто входит в несколько треугольников (в среднем, 6)
- Если использовать `GL_TRIANGLES`, придётся копировать каждую вершину несколько раз
- `GL_TRIANGLE_STRIP` и т.п. только частично решают проблему
- $\Rightarrow$ Индексированный рендеринг

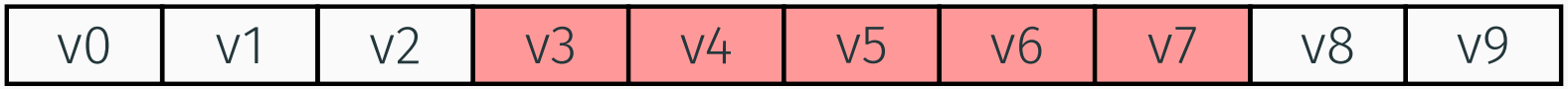
Индексированный рендеринг

- `glDrawArrays(mode, 3, 5)`:

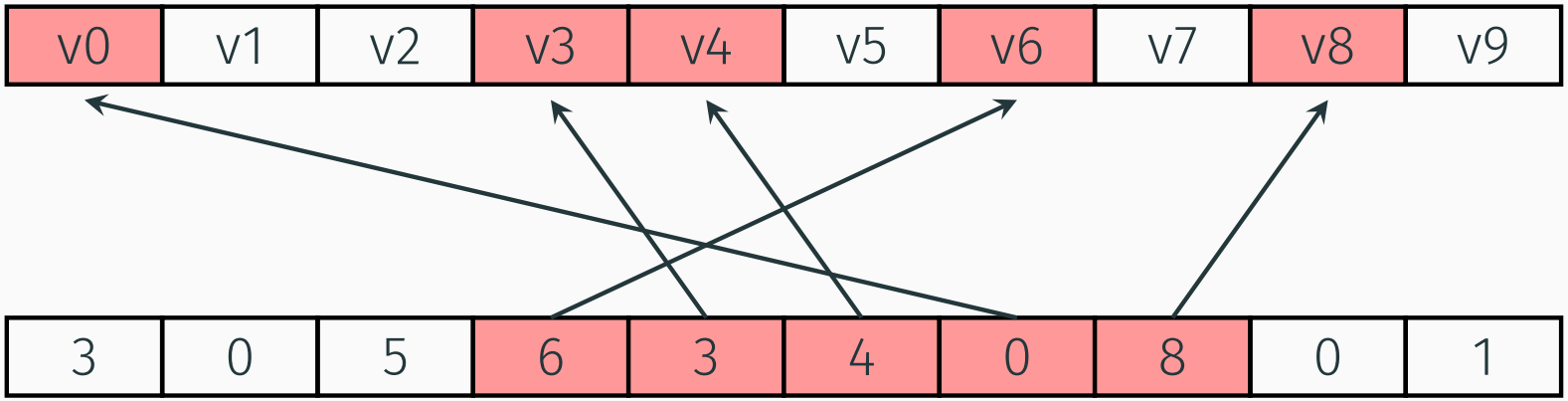


Индексированный рендеринг

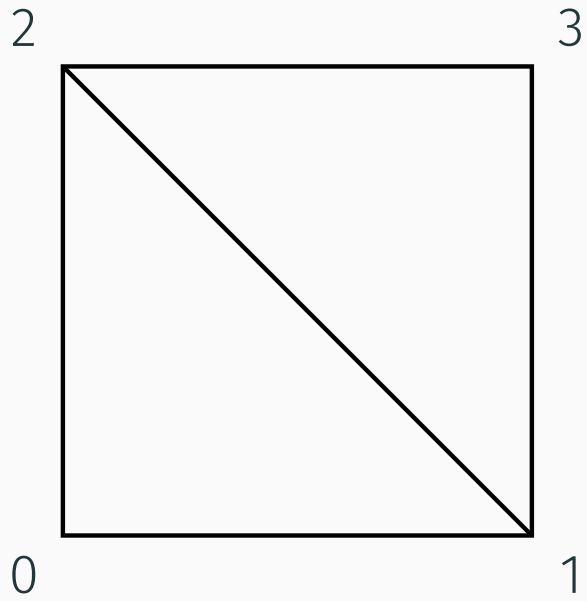
- `glDrawArrays(mode, 3, 5)`:



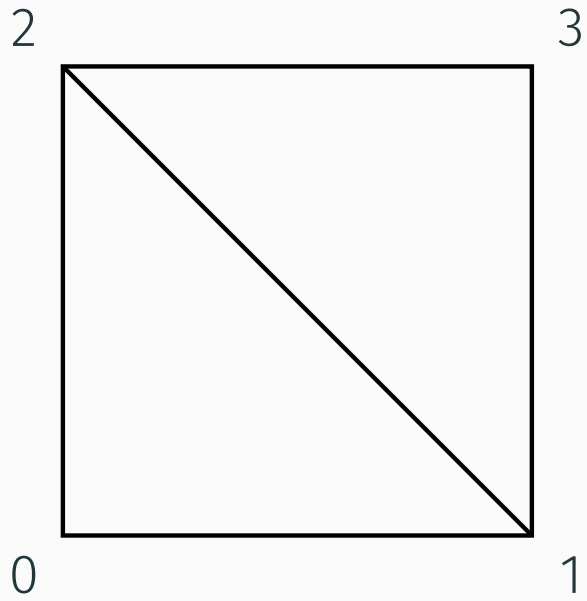
- `glDrawElements(mode, ...)`:



Индексированный рендеринг: квадрат

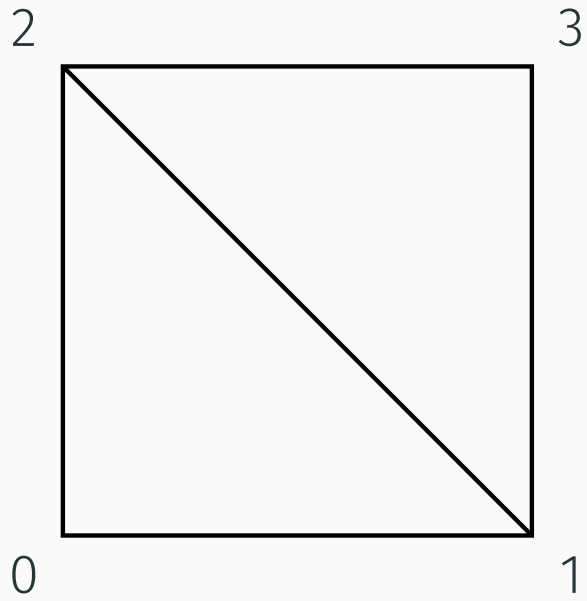


Индексированный рендеринг: квадрат



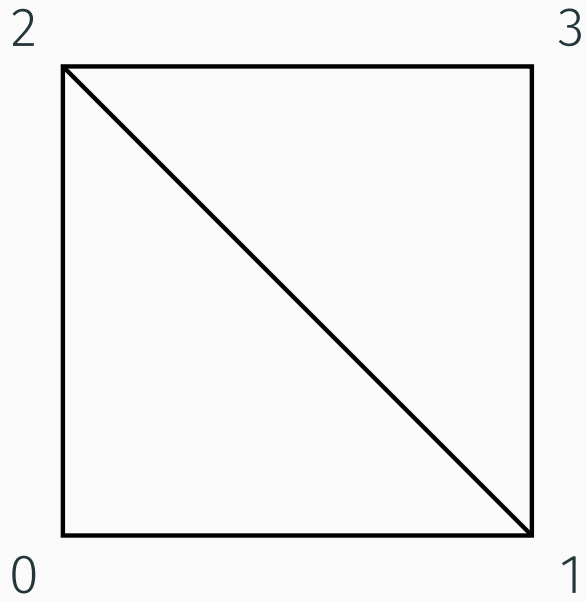
- Без индексов, `GL_TRIANGLES`:
  - Вершины: `v0, v1, v2, v2, v1, v3`

Индексированный рендеринг: квадрат



- Без индексов, `GL_TRIANGLES`:
  - Вершины: `v0, v1, v2, v2, v1, v3`
- Без индексов, `GL_TRIANGLE_STRIP`:
  - Вершины: `v0, v1, v2, v3`

Индексированный рендеринг: квадрат



- Без индексов, `GL_TRIANGLES`:
  - Вершины: `v0, v1, v2, v2, v1, v3`
- Без индексов, `GL_TRIANGLE_STRIP`:
  - Вершины: `v0, v1, v2, v3`
- С индексами, `GL_TRIANGLES`:
  - Вершины: `v0, v1, v2, v3`
  - Индексы: `0, 1, 2, 2, 1, 3`

Индексированный рендеринг

- Индексы хранятся в `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER`

Индексированный рендеринг

- Индексы хранятся в `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER`
- id текущего `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER` хранится в текущем VAO!

Индексированный рендеринг

- Индексы хранятся в `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER`
- id текущего `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER` хранится в текущем VAO!
- $\Longrightarrow$ `glBindVertexArray` автоматически делает текущим нужный `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER` с индексами

Индексированный рендеринг

- Индексы хранятся в `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER`
- id текущего `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER` хранится в текущем VAO!
- $\Longrightarrow$ `glBindVertexArray` автоматически делает текущим нужный `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER` с индексами
- Если вы хотите только *загрузить* индексы, но пока не *использовать* их, лучше использовать `target = GL_ARRAY_BUFFER`, чтобы случайно не испортить текущий VAO

Индексированный рендеринг

```
glDrawElements(GLenum mode, GLsizei count,
    GLenum type, const GLvoid * indices)
```

Индексированный рендеринг

```
glDrawElements(GLenum mode, GLsizei count,
    GLenum type, const GLvoid * indices)
```

- `mode` – как в `glDrawArrays`: `GL_TRIANGLES`, ...

Индексированный рендеринг

```
glDrawElements(GLenum mode, GLsizei count,
    GLenum type, const GLvoid * indices)
```

- `mode` – как в `glDrawArrays`: `GL_TRIANGLES`, ...
- `count` – количество индексов

Индексированный рендеринг

```
glDrawElements(GLenum mode, GLsizei count,
    GLenum type, const GLvoid * indices)
```

- `mode` – как в `glDrawArrays`: `GL_TRIANGLES`, ...
- `count` – количество индексов
- `type` – тип индексов: `GL_UNSIGNED_BYTE`, `GL_UNSIGNED_SHORT`, `GL_UNSIGNED_INT`

Индексированный рендеринг

```
glDrawElements(GLenum mode, GLsizei count,
    GLenum type, const GLvoid * indices)
```

- `mode` – как в `glDrawArrays`: `GL_TRIANGLES`, ...
- `count` – количество индексов
- `type` – тип индексов: `GL_UNSIGNED_BYTE`, `GL_UNSIGNED_SHORT`, `GL_UNSIGNED_INT`
- `indices` – смещение в байтах в текущем `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER` до места, где начинаются индексы

Индексированный рендеринг

```
glDrawElements(GLenum mode, GLsizei count,
    GLenum type, const GLvoid * indices)
```

- `mode` – как в `glDrawArrays`: `GL_TRIANGLES`, ...
- `count` – количество индексов
- `type` – тип индексов: `GL_UNSIGNED_BYTE`, `GL_UNSIGNED_SHORT`, `GL_UNSIGNED_INT`
- `indices` – смещение в байтах в текущем `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER` до места, где начинаются индексы
  - id текущего `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER` хранится в текущем VAO!

Индексированный рендеринг

```
glDrawElements(GLenum mode, GLsizei count,
    GLenum type, const GLvoid * indices)
```

- `mode` – как в `glDrawArrays`: `GL_TRIANGLES`, ...
- `count` – количество индексов
- `type` – тип индексов: `GL_UNSIGNED_BYTE`, `GL_UNSIGNED_SHORT`, `GL_UNSIGNED_INT`
- `indices` – смещение в байтах в текущем `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER` до места, где начинаются индексы
  - id текущего `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER` хранится в текущем VAO!
  - $\Longrightarrow$ Для рендеринга не нужно делать текущим буфер с индексами, достаточно сделать текущим VAO

Индексированный рендеринг: пример

```
// Инициализация:
program = createProgram()
vertices, indices = generateMesh()
vbo = createBuffer(vertices)
ebo = createBuffer(indices)
vao = createVAO()

glBindVertexArray(vao)
glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vbo)
// настраиваем аттрибуты...
// загружаем вершины в vbo...
glBindBuffer(GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER, ebo)
// загружаем индексы в ebo...

// Рендеринг:
glUseProgram(program)
glBindVertexArray(vao)
glDrawElements(GL_TRIANGLES, count, GL_UNSIGNED_SHORT,
    (void*)(0))
```

Primitive restart

- При использовании `GL_LINE_STRIP`, `GL_LINE_LOOP`, `GL_TRIANGLE_STRIP`, `GL_TRIANGLE_FAN` все входные вершины образуют один line strip, line loop, triangle strip, triangle fan соответственно

Primitive restart

- При использовании `GL_LINE_STRIP`, `GL_LINE_LOOP`, `GL_TRIANGLE_STRIP`, `GL_TRIANGLE_FAN` все входные вершины образуют один line strip, line loop, triangle strip, triangle fan соответственно
- Что, если мы хотим одну последовательность вершин разбить на несколько примитивов?

Primitive restart

- При использовании `GL_LINE_STRIP`, `GL_LINE_LOOP`, `GL_TRIANGLE_STRIP`, `GL_TRIANGLE_FAN` все входные вершины образуют один line strip, line loop, triangle strip, triangle fan соответственно
- Что, если мы хотим одну последовательность вершин разбить на несколько примитивов?
- Можно сделать несколько вызовов `glDraw*`, но это медленно

Primitive restart

- При использовании `GL_LINE_STRIP`, `GL_LINE_LOOP`, `GL_TRIANGLE_STRIP`, `GL_TRIANGLE_FAN` все входные вершины образуют один line strip, line loop, triangle strip, triangle fan соответственно
- Что, если мы хотим одну последовательность вершин разбить на несколько примитивов?
- Можно сделать несколько вызовов `glDraw*`, но это медленно
- Специальное значение индекса вершины означает что со следующей вершины нужно начать новый примитив:
  `[0, 1, 2, 3, 65535, 4, 5, 6, 7]` эквивалентно
  `[0, 1, 2, 3], [4, 5, 6, 7]`

Primitive restart

- При использовании `GL_LINE_STRIP`, `GL_LINE_LOOP`, `GL_TRIANGLE_STRIP`, `GL_TRIANGLE_FAN` все входные вершины образуют один line strip, line loop, triangle strip, triangle fan соответственно
- Что, если мы хотим одну последовательность вершин разбить на несколько примитивов?
- Можно сделать несколько вызовов `glDraw*`, но это медленно
- Специальное значение индекса вершины означает что со следующей вершины нужно начать новый примитив:
  `[0, 1, 2, 3, 65535, 4, 5, 6, 7]` эквивалентно
  `[0, 1, 2, 3], [4, 5, 6, 7]`
- Включить: `glEnable(GL_PRIMITIVE_RESTART)`

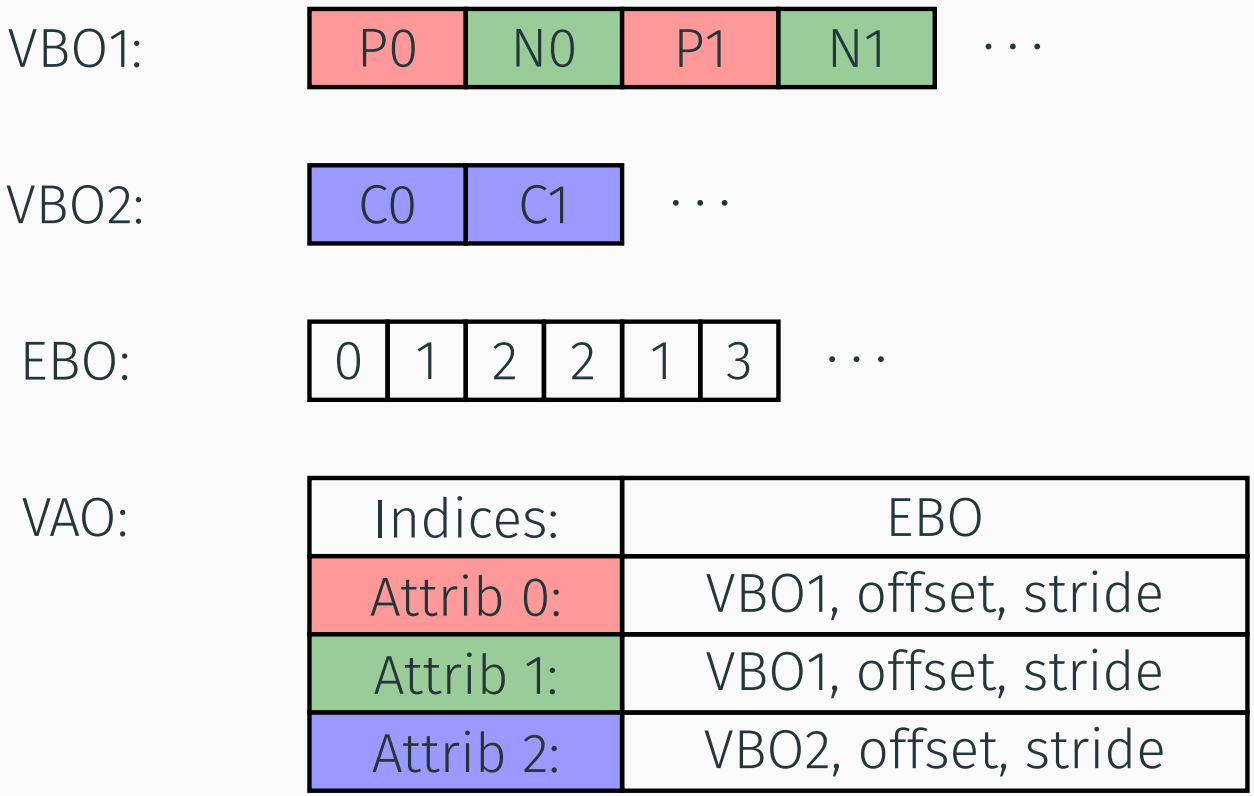
Primitive restart

- При использовании `GL_LINE_STRIP`, `GL_LINE_LOOP`, `GL_TRIANGLE_STRIP`, `GL_TRIANGLE_FAN` все входные вершины образуют один line strip, line loop, triangle strip, triangle fan соответственно
- Что, если мы хотим одну последовательность вершин разбить на несколько примитивов?
- Можно сделать несколько вызовов `glDraw*`, но это медленно
- Специальное значение индекса вершины означает что со следующей вершины нужно начать новый примитив:
  `[0, 1, 2, 3, 65535, 4, 5, 6, 7]` эквивалентно
  `[0, 1, 2, 3], [4, 5, 6, 7]`
- Включить: `glEnable(GL_PRIMITIVE_RESTART)`
- Настроить специальное значение:
  `glPrimitiveRestartIndex(index)`

Индексированный рендеринг: ссылки

- khronos.org/opengl/wiki/Vertex_Rendering#Basic_Drawing
- opengl-tutorial.org/intermediate-tutorials/tutorial-9-vbo-indexing

VAO, VBO, EBO: схема



Рендеринг нескольких объектов

- Обычно: для каждого объекта свой набор VAO+VBO(+EBO)
- Для обновления данных нужны только VBO (и, возможно, EBO)
- Для рисования нужен только VAO

Рендеринг нескольких объектов

Инициализация:

```
for (o in objects) {
    glGenVertexArrays(1, &o.vao)
    glGenBuffers(1, &o.vbo)
    glGenBuffers(1, &o.ebo)

    glBindVertexArray(o.vao)
    glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, o.vbo)
    for (i in attribs) {
        glEnableVertexAttribArray(i)
        glVertexAttribPointer(i, ...)
    }

    // запомнится в o.vao
    glBindBuffer(GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER, o.ebo)
}
```

Рендеринг нескольких объектов

Загрузка данных:

```
for (o in objects) {
    glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, o.vbo)
    glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, o.vertices)

    glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, o.ebo)
    glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, o.indices)
}
```

Рендеринг нескольких объектов

Рендеринг:

```
glUseProgram(program)
glUniform(...)
for (o in objects) {
    glBindVertexArray(o.vao)
    glDrawElements(o.indexCount)
}
```