Компьютерная графика

Лекция 2: Графический конвейер, шейдеры, аффинные преобразования

2021

Растеризация

- Растеризация – превращение геометрического примитива (точки, линии, треугольника, прямоугольника, круга, и т.д.) в набор соответствующих ему пикселей на экране/изображении
- Превращение векторных данных в растровые

Растеризация

- Растеризация – превращение геометрического примитива (точки, линии, треугольника, прямоугольника, круга, и т.д.) в набор соответствующих ему пикселей на экране/изображении
- Превращение векторных данных в растровые
- За нас её делает OpenGL!

Растеризация

- Растеризация – превращение геометрического примитива (точки, линии, треугольника, прямоугольника, круга, и т.д.) в набор соответствующих ему пикселей на экране/изображении
- Превращение векторных данных в растровые
- За нас её делает OpenGL!
- Некоторые современные графические движки GPU (Unreal 5 Nanite) делают растеризацию сами с помощью compute шейдеров

Растеризация: точка

- Как растеризовать точку (x, y)?

Растеризация: точка

- Как растеризовать точку (x, y)?

```
set_pixel(round(x), round(y), color);
```

Растеризация: точка

- Как растеризовать точку (x, y)?

  `set_pixel(round(x), round(y), color);`
- В OpenGL: `GL_POINTS`

Растеризация: линия

- Как растеризовать линию $(x_1, y_1) \dots (x_2, y_2)$?

Растеризация: линия

- Как растеризовать линию $(x_1, y_1) \dots (x_2, y_2)$?
- Алгоритм Брезенхэма

Растеризация: линия

- Как растеризовать линию $(x_1, y_1) \dots (x_2, y_2)$?
- Алгоритм Брезенхэма
- Есть вариация алгоритма для рисования окружностей

Растеризация: линия

- Как растеризовать линию $(x_1, y_1) \dots (x_2, y_2)$?
- Алгоритм Брезенхэма
- Есть вариация алгоритма для рисования окружностей
- В OpenGL: `GL_LINES`

Растеризация: прямоугольник

- Как растеризовать прямоугольник $[x_1 \dots x_2] \times [y_1 \dots y_2]$?

Растеризация: прямоугольник

- Как растеризовать прямоугольник $[x_1 \dots x_2] \times [y_1 \dots y_2]$?

```
for (int x = round(x_1); x <= round(x_2); ++x) {
    for (int y = round(y_1); y <= round(y_2); ++y) {
        set_pixel(x, y, color);
    }
}
```

Растеризация: треугольник

- Как растеризовать треугольник с вершинами $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$?

Растеризация: треугольник

- Как растеризовать треугольник с вершинами $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$?
- Растеризуем ограничивающий прямоугольник, проверяя пиксели на вхождение в треугольник

Растеризация: треугольник

- Как растеризовать треугольник с вершинами $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$?
- Растеризуем ограничивающий прямоугольник, проверяя пиксели на вхождение в треугольник

```
int xmin = min(round(x_1), round(x_2), round(x_3));
int xmax = max(round(x_1), round(x_2), round(x_3));

int ymin = min(round(y_1), round(y_2), round(y_3));
int ymax = max(round(y_1), round(y_2), round(y_3));

for (int x = xmin; x <= xmax; ++x) {
    for (int y = ymin; y <= ymax; ++y) {
        if (inside_triangle(x, y, ...))
            set_pixel(x, y, color);
    }
}
```

Растеризация: треугольник

- Как растеризовать треугольник с вершинами $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$?
- Растеризуем ограничивающий прямоугольник, проверяя пиксели на вхождение в треугольник

```
int xmin = min(round(x_1), round(x_2), round(x_3));
int xmax = max(round(x_1), round(x_2), round(x_3));

int ymin = min(round(y_1), round(y_2), round(y_3));
int ymax = max(round(y_1), round(y_2), round(y_3));

for (int x = xmin; x <= xmax; ++x) {
    for (int y = ymin; y <= ymax; ++y) {
        if (inside_triangle(x, y, ...))
            set_pixel(x, y, color);
    }
}
```

- В OpenGL: `GL_TRIANGLES`

Растеризация: круг

- Как растеризовать круг с центром (x_0, y_0) и радиусом R?

Растеризация: круг

- Как растеризовать круг с центром (x_0, y_0) и радиусом R?
- Растеризуем ограничивающий прямоугольник, проверяя пиксели на вхождение в круг

Растеризация: круг

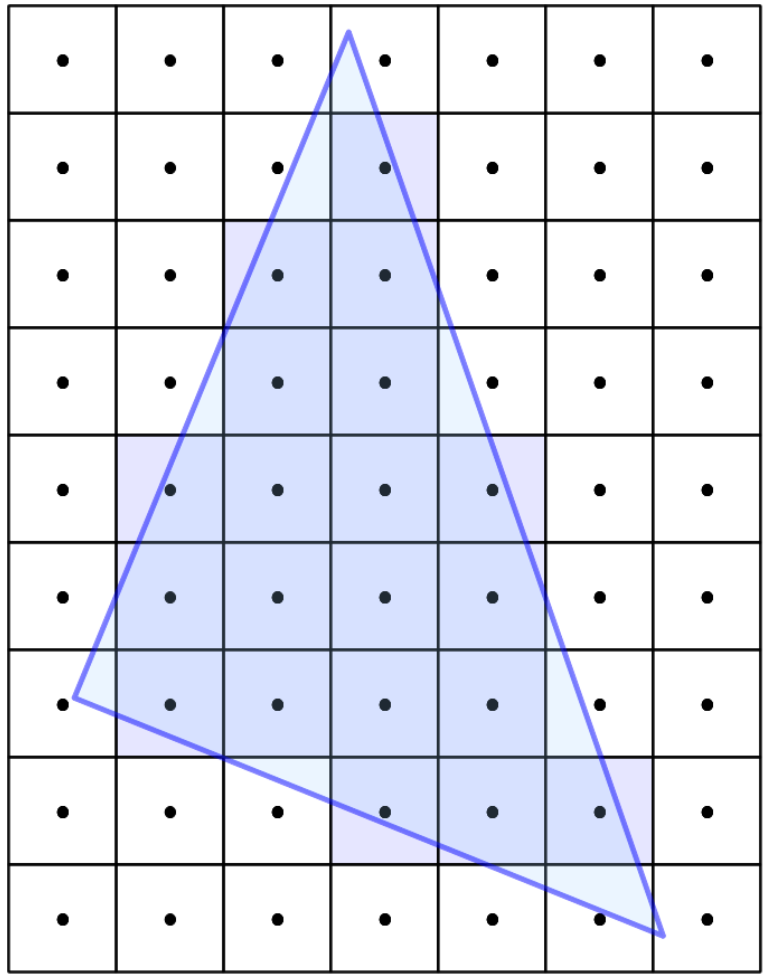
- Как растеризовать круг с центром (x_0, y_0) и радиусом R?
- Растеризуем ограничивающий прямоугольник, проверяя пиксели на вхождение в круг

```
int xmin = round(x_0 - R);
int xmax = round(x_0 + R);

int ymin = round(y_0 - R);
int ymax = round(y_0 + R);

for (int x = xmin; x <= xmax; ++x) {
    for (int y = ymin; y <= ymax; ++y) {
        if (sqr(x - x_0) + sqr(y - y_0) <= sqr(R))
            set_pixel(x, y, color);
    }
}
```

Растеризация: OpenGL

- Пиксель растеризуется, если центр пикселя содержится в треугольнике

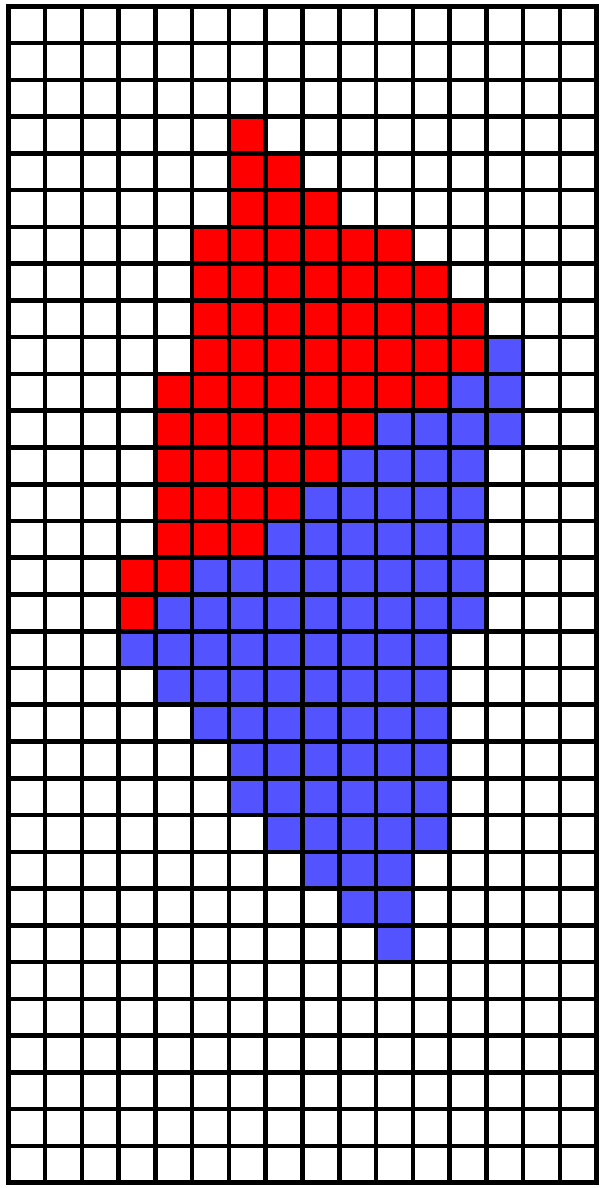
Растеризация: OpenGL



Растеризация: OpenGL

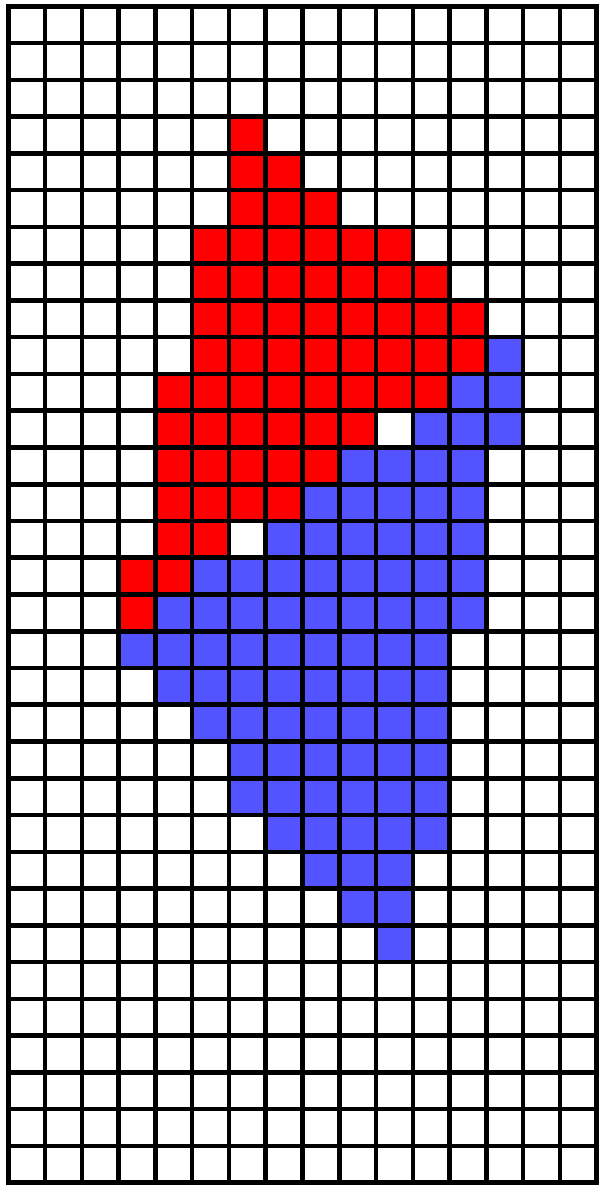
- Пиксель растеризуется, если центр пикселя содержится в треугольнике
- Если у двух треугольников есть общее ребро (и они не пересекаются внутренностями), то
  - Каждый пиксель будет принадлежать ровно одному треугольнику, т.е. не будет наложения
  - Ни один пиксель не будет пропущен, т.е. не будет "дырок"

Растеризация: OpenGL



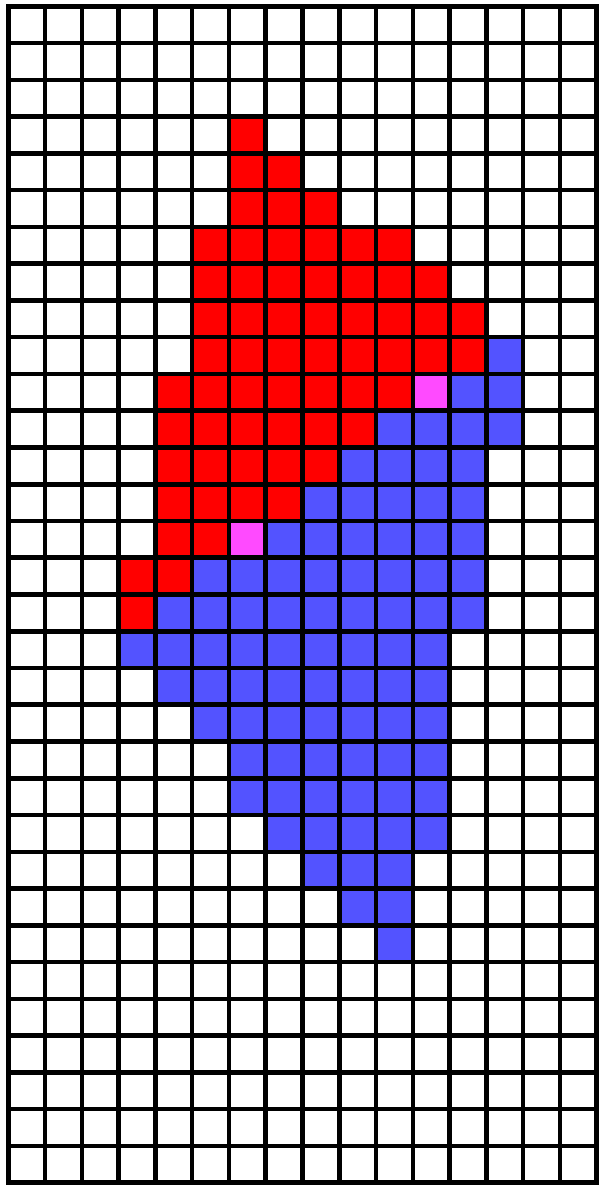
Растеризация: OpenGL

Не будет "дырок":



Растеризация: OpenGL

Не будет наложения пикселей:



Растеризация: OpenGL

- Пиксель растеризуется, если центр пикселя содержится в треугольнике
- Если у двух треугольников есть общее ребро (и они не пересекаются внутренностями), то
  - Каждый пиксель будет принадлежать ровно одному треугольнику, т.е. не будет наложения
  - Ни один пиксель не будет пропущен, т.е. не будет "дырок"
- Подробнее: en.wikibooks.org/wiki/GLSL_Programming/Rasterization

Растеризация: OpenGL

- В современном OpenGL есть только три примитива для растеризации:

Растеризация: OpenGL

- В современном OpenGL есть только три примитива для растеризации:
- Точки: `GL_POINTS`

Растеризация: OpenGL

- В современном OpenGL есть только три примитива для растеризации:
- Точки: `GL_POINTS`
- Линии: `GL_LINE_STRIP`, `GL_LINE_LOOP`, `GL_LINES`

Растеризация: OpenGL

- В современном OpenGL есть только три примитива для растеризации:
- Точки: `GL_POINTS`
- Линии: `GL_LINE_STRIP`, `GL_LINE_LOOP`, `GL_LINES`
- Треугольники: `GL_TRIANGLE_STRIP`, `GL_TRIANGLE_FAN`, `GL_TRIANGLES`

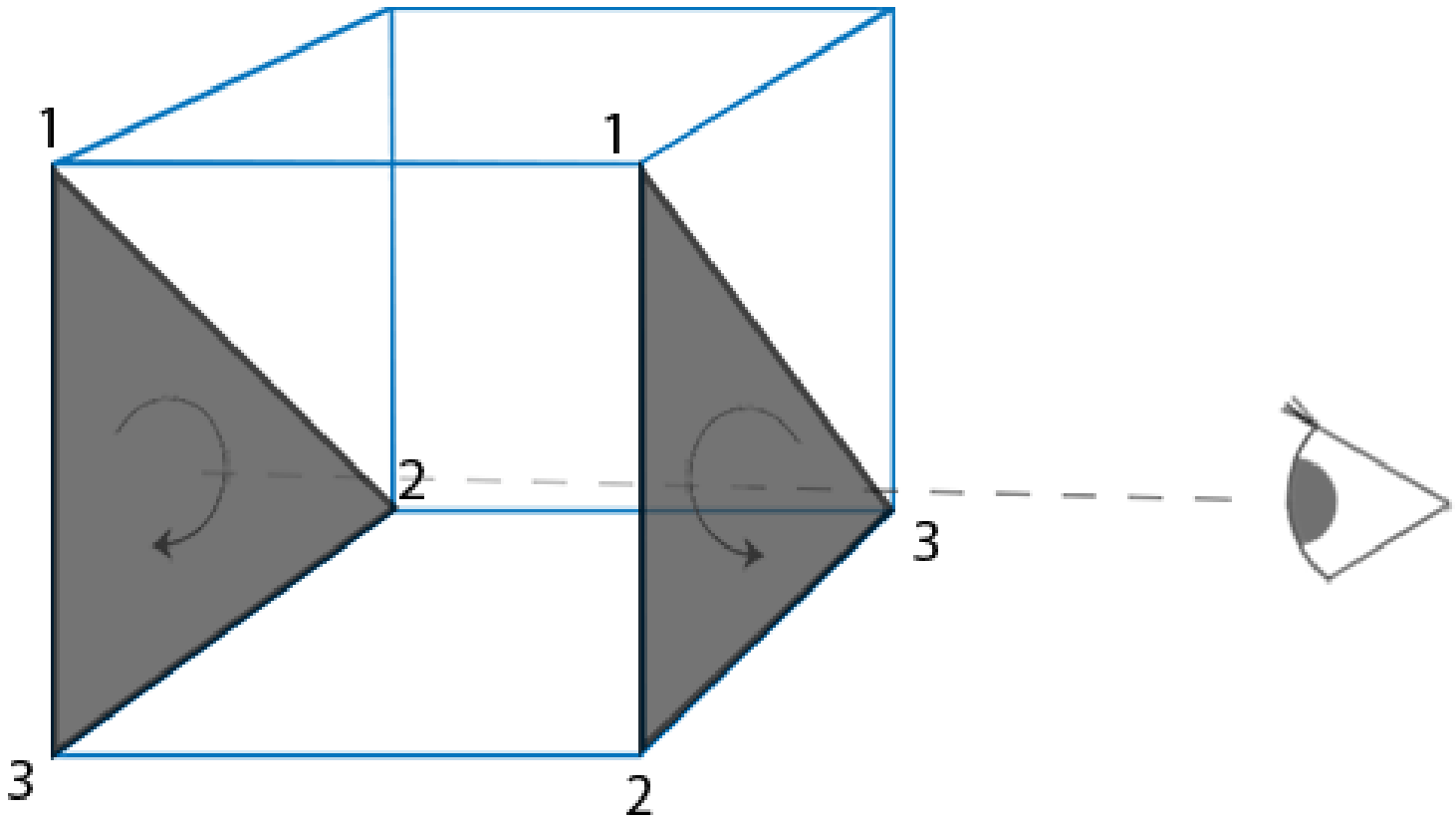
Растеризация: OpenGL

- В современном OpenGL есть только три примитива для растеризации:
- Точки: `GL_POINTS`
- Линии: `GL_LINE_STRIP`, `GL_LINE_LOOP`, `GL_LINES`
- Треугольники: `GL_TRIANGLE_STRIP`, `GL_TRIANGLE_FAN`, `GL_TRIANGLES`
- Для геометрических шейдеров: `GL_LINE_STRIP_ADJACENCY`, `GL_LINES_ADJACENCY`, `GL_TRIANGLE_STRIP_ADJACENCY`, `GL_TRIANGLES_ADJACENCY`

Back-face culling

- По умолчанию в OpenGL треугольники, вершины которых оказываются на экране в порядке обхода **по часовой стрелке**, не рисуются

Back-face culling



Back-face culling

- По умолчанию в OpenGL треугольники, вершины которых оказываются на экране в порядке обхода **по часовой стрелке**, не рисуются
  - Чтобы не рисовать треугольники, которые всё равно будут скрыты другими треугольниками спереди

Back-face culling

- По умолчанию в OpenGL треугольники, вершины которых оказываются на экране в порядке обхода **по часовой стрелке**, не рисуются
  - Чтобы не рисовать треугольники, которые всё равно будут скрыты другими треугольниками спереди
- Включить/выключить это поведение: `glEnable(GL_CULL_FACE)` или `glDisable(GL_CULL_FACE)`

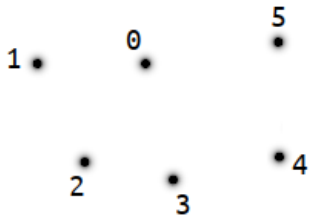
Back-face culling

- По умолчанию в OpenGL треугольники, вершины которых оказываются на экране в порядке обхода **по часовой стрелке**, не рисуются
  - Чтобы не рисовать треугольники, которые всё равно будут скрыты другими треугольниками спереди
- Включить/выключить это поведение: `glEnable(GL_CULL_FACE)` или `glDisable(GL_CULL_FACE)`
- Настроить, какие треугольники будут скрываться: `glCullFace(GL_BACK)`, `glCullFace(GL_FRONT)`, `glCullFace(GL_FRONT_AND_BACK)`

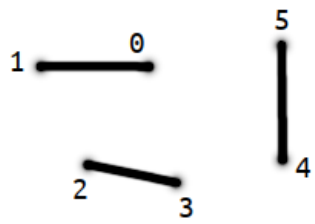
Back-face culling

- По умолчанию в OpenGL треугольники, вершины которых оказываются на экране в порядке обхода **по часовой стрелке**, не рисуются
  - Чтобы не рисовать треугольники, которые всё равно будут скрыты другими треугольниками спереди
- Включить/выключить это поведение: `glEnable(GL_CULL_FACE)` или `glDisable(GL_CULL_FACE)`
- Настроить, какие треугольники будут скрываться: `glCullFace(GL_BACK)`, `glCullFace(GL_FRONT)`, `glCullFace(GL_FRONT_AND_BACK)`
- Настроить, какие треугольники считаются `FRONT`, а какие - `BACK`: `glFrontFace(GL_CCW)`, `glFrontFace(GL_CW)`

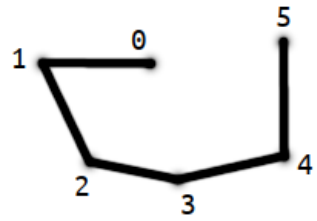
Группировка вершин по примитивам (primitive assembly)



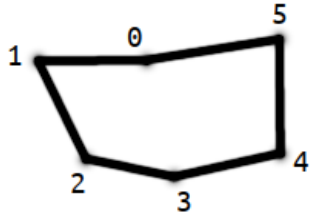
GL_POINTS



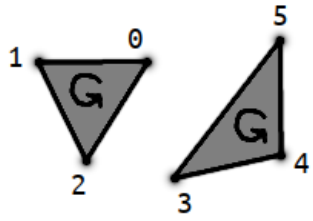
GL_LINES



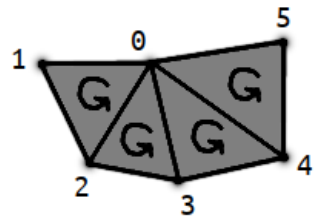
GL_LINE_STRIP



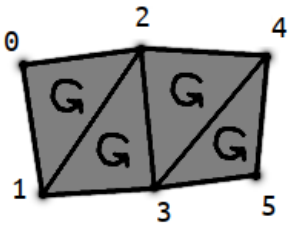
GL_LINE_LOOP



GL_TRIANGLES



GL_TRIANGLE_FAN



GL_TRIANGLE_STRIP

Графический конвейер (graphics pipeline)

Графический конвейер (graphics pipeline)

- Входной поток вершин (vertex stream)

Графический конвейер (graphics pipeline)

- Входной поток вершин (vertex stream)
- Вершинный шейдер: обрабатывает вершины по одной
  - Должен записать `vec4 gl_Position`

Графический конвейер (graphics pipeline)

- Входной поток вершин (vertex stream)
- Вершинный шейдер: обрабатывает вершины по одной
  - Должен записать `vec4 gl_Position`
- Сборка примитивов (primitive assembly)

Графический конвейер (graphics pipeline)

- Входной поток вершин (vertex stream)
- Вершинный шейдер: обрабатывает вершины по одной
  - Должен записать `vec4 gl_Position`
- Сборка примитивов (primitive assembly)
- Преобразование в оконную систему координат (viewport transform)
  - $X : [-1, 1] \to [0, \mathit{width}]$
  - $Y : [-1, 1] \to [\mathit{height}, 0]$ (-1 внизу, 1 вверху)
  - `glViewport(0, 0, width, height)`

Графический конвейер (graphics pipeline)

- Входной поток вершин (vertex stream)
- Вершинный шейдер: обрабатывает вершины по одной
  - Должен записать `vec4 gl_Position`
- Сборка примитивов (primitive assembly)
- Преобразование в оконную систему координат (viewport transform)
  - $X : [-1, 1] \to [0, \mathit{width}]$
  - $Y : [-1, 1] \to [\mathit{height}, 0]$ (-1 внизу, 1 вверху)
  - `glViewport(0, 0, width, height)`
- Back-face culling

Графический конвейер (graphics pipeline)

- Входной поток вершин (vertex stream)
- Вершинный шейдер: обрабатывает вершины по одной
  - Должен записать `vec4 gl_Position`
- Сборка примитивов (primitive assembly)
- Преобразование в оконную систему координат (viewport transform)
  - $X : [-1, 1] \to [0, width]$
  - $Y : [-1, 1] \to [height, 0]$ (-1 внизу, 1 вверху)
  - `glViewport(0, 0, width, height)`
- Back-face culling
- Растеризация примитивов: примитив превращается в набор пикселей
  - Линейная интерполяция значений, переданных из вершинного шейдера во фрагментный

Графический конвейер (graphics pipeline)

- Входной поток вершин (vertex stream)
- Вершинный шейдер: обрабатывает вершины по одной
  - Должен записать `vec4 gl_Position`
- Сборка примитивов (primitive assembly)
- Преобразование в оконную систему координат (viewport transform)
  - $X : [-1, 1] \to [0, width]$
  - $Y : [-1, 1] \to [height, 0]$ (-1 внизу, 1 вверху)
  - `glViewport(0, 0, width, height)`
- Back-face culling
- Растеризация примитивов: примитив превращается в набор пикселей
  - Линейная интерполяция значений, переданных из вершинного шейдера во фрагментный
- Пиксельный (фрагментный) шейдер: обрабатывает пиксели по одному

Графический конвейер (graphics pipeline)

- Мы пропустили много важных частей конвейера
- Будем их по чуть-чуть добавлять в течение курса

Вершинный (vertex) шейдер

Вершинный (vertex) шейдер

- Входные данные:

Вершинный (vertex) шейдер

- Входные данные:
  - Аттрибуты вершин (мы позже узнаем, как их задавать) - свои для каждой вершины

Вершинный (vertex) шейдер

- Входные данные:
  - Аттрибуты вершин (мы позже узнаем, как их задавать) - свои для каждой вершины
  - Uniform-переменные - глобальные значения, не меняющиеся в течение одного вызова команды рисования (`glDrawArrays`)

Вершинный (vertex) шейдер

- Входные данные:
  - Аттрибуты вершин (мы позже узнаем, как их задавать) - свои для каждой вершины
  - Uniform-переменные - глобальные значения, не меняющиеся в течение одного вызова команды рисования (`glDrawArrays`)
- Выходные данные:
  - `vec4 gl_Position`

Вершинный (vertex) шейдер

- Входные данные:
  - Аттрибуты вершин (мы позже узнаем, как их задавать) - свои для каждой вершины
  - Uniform-переменные - глобальные значения, не меняющиеся в течение одного вызова команды рисования (`glDrawArrays`)
- Выходные данные:
  - `vec4 gl_Position`
  - Переменные, интерполированное значение которых попадёт во фрагментный (пиксельный) шейдер: `out vec3 color`

Флагментный (пиксельный, fragment) шейдер

Флагментный (пиксельный, fragment) шейдер

- Входные данные:

Флагментный (пиксельный, fragment) шейдер

- Входные данные:
  - Проинтерполированные `out`-переменные вершинного шейдера: `in vec3 color`

Флагментный (пиксельный, fragment) шейдер

- Входные данные:
  - Проинтерполированные `out`-переменные вершинного шейдера: `in vec3 color`
  - `gl_FragCoord` - координаты пикселя $(-1 \ldots 1)$

Флагментный (пиксельный, fragment) шейдер

- Входные данные:
  - Проинтерполированные `out`-переменные вершинного шейдера: `in vec3 color`
  - `gl_FragCoord` - координаты пикселя $(-1 \ldots 1)$
  - И много других: khronos.org/opengl/wiki/Fragment_Shader/Defined_Inputs

Флагментный (пиксельный, fragment) шейдер

- Входные данные:
  - Проинтерполированные `out`-переменные вершинного шейдера: `in vec3 color`
  - `gl_FragCoord` - координаты пикселя $(-1 \ldots 1)$
  - И много других: khronos.org/opengl/wiki/Fragment_Shader/Defined_Inputs
- Выходные данные:
  - `layout (location = 0) out vec4 out_color;` - выходной цвет в формате RGBA

Флагментный (пиксельный, fragment) шейдер

- Входные данные:
  - Проинтерполированные `out`-переменные вершинного шейдера: `in vec3 color`
  - `gl_FragCoord` - координаты пикселя $(-1 \ldots 1)$
  - И много других: khronos.org/opengl/wiki/Fragment_Shader/Defined_Inputs
- Выходные данные:
  - `layout (location = 0) out vec4 out_color;` - выходной цвет в формате RGBA
  - Может быть несколько, об этом поговорим позже