

Компьютерная графика

Лекция 4: Камера, проекции, буфер глубины

2021

Проекции

- ▶ Мир - двухмерный/трёхмерный, произвольного размера, смотрим с произвольного ракурса

Проекции

- ▶ Мир - двухмерный/трёхмерный, произвольного размера, смотрим с произвольного ракурса
- ▶ Экран - двухмерный, $[-1, 1] \times [-1, 1]$

Проекции

- ▶ Мир - двухмерный/трёхмерный, произвольного размера, смотрим с произвольного ракурса
- ▶ Экран - двухмерный, $[-1, 1] \times [-1, 1]$
 - ▶ Координата Z тоже $[-1, 1]$
 - ▶ Про неё поговорим подробнее чуть позже

Проекции

- ▶ Мир - двухмерный/трёхмерный, произвольного размера, смотрим с произвольного ракурса
- ▶ Экран - двухмерный, $[-1, 1] \times [-1, 1]$
 - ▶ Координата Z тоже $[-1, 1]$
 - ▶ Про неё поговорим подробнее чуть позже
- ▶ За преобразование отвечает проекция

Ортографическая проекция

- ▶ Самый простой способ:

Ортографическая проекция

- ▶ Самый простой способ: игнорировать третью координату

Концептуально: $(x, y, z) \mapsto (x, y)$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ортографическая проекция

- ▶ Самый простой способ: игнорировать третью координату

Концептуально: $(x, y, z) \mapsto (x, y)$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- ▶ Именно это делает OpenGL (если `gl_Position.w = 1`)

Ортографическая проекция

- ▶ Самый простой способ: игнорировать третью координату

Концептуально: $(x, y, z) \mapsto (x, y)$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- ▶ Именно это делает OpenGL (если `gl_Position.w = 1`)
- ▶ X и Y всё ещё $[-1, 1]$

Ортографическая проекция

- ▶ Самый простой способ: игнорировать третью координату

Концептуально: $(x, y, z) \mapsto (x, y)$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- ▶ Именно это делает OpenGL (если `gl_Position.w = 1`)
- ▶ X и Y всё ещё $[-1, 1]$
- ▶ Как сделать $X \in [-W, W]$ и $Y \in [-H, H]$?

Ортографическая проекция

- ▶ Самый простой способ: игнорировать третью координату

Концептуально: $(x, y, z) \mapsto (x, y)$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- ▶ Именно это делает OpenGL (если `gl_Position.w = 1`)
- ▶ X и Y всё ещё $[-1, 1]$
- ▶ Как сделать $X \in [-W, W]$ и $Y \in [-H, H]$?

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{W} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{H} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ортографическая проекция

- ▶ Как сделать $X \in [X_0 - W, X_0 + W]$ и $Y \in [Y_0 - H, Y_0 + H]$?

Ортографическая проекция

- ▶ Как сделать $X \in [X_0 - W, X_0 + W]$ и $Y \in [Y_0 - H, Y_0 + H]$?
 - ▶ Сдвинуть на $(-X_0, -Y_0)$, а затем применить масштабирование:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{W} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{H} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_0 \\ 0 & 1 & 0 & -Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ортографическая проекция

- ▶ Как сделать $X \in [X_0 - W, X_0 + W]$ и $Y \in [Y_0 - H, Y_0 + H]$?
 - ▶ Сдвинуть на $(-X_0, -Y_0)$, а затем применить масштабирование:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{W} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{H} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_0 \\ 0 & 1 & 0 & -Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- ▶ Если размер области W , нужно разделить на W
- ▶ Если центр в X_0 , нужно сдвинуть на $-X_0$

Ортографическая проекция

- ▶ Как сделать $X \in [X_0 - W, X_0 + W]$ и $Y \in [Y_0 - H, Y_0 + H]$?
 - ▶ Сдвинуть на $(-X_0, -Y_0)$, а затем применить масштабирование:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{W} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{H} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_0 \\ 0 & 1 & 0 & -Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- ▶ Если размер области W , нужно разделить на W
- ▶ Если центр в X_0 , нужно сдвинуть на $-X_0$
- ▶ Общая идея: если камера получена каким-то преобразованием, нужно применить обратное преобразование

Ортографическая проекция: обратное преобразование

- ▶ Можно считать, что по умолчанию (если `gl_Position.w = 1`) OpenGL делает ортографическую проекцию на квадрат $[-1, 1]^2$ в плоскости XY параллельно оси Z
- ▶ Камера находится в начале координат

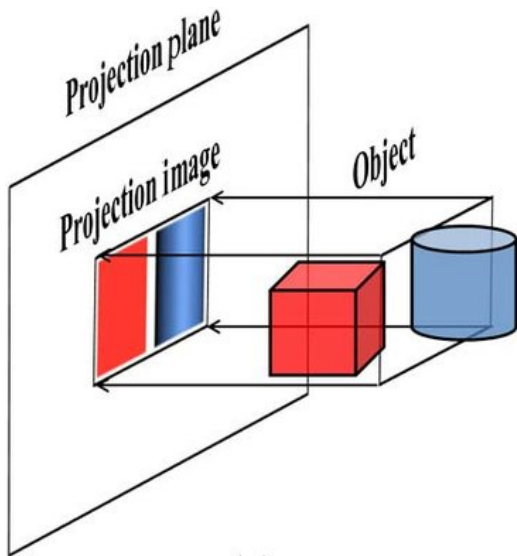
Ортографическая проекция: обратное преобразование

- ▶ Можно считать, что по умолчанию (если `gl_Position.w = 1`) OpenGL делает ортографическую проекцию на квадрат $[-1, 1]^2$ в плоскости XY параллельно оси Z
- ▶ Камера находится в начале координат
- ▶ Если ко всему виртуальному миру (включая камеру!) применить аффинное преобразование, изображение не изменится

Ортографическая проекция: обратное преобразование

- ▶ Можно считать, что по умолчанию (если `gl_Position.w = 1`) OpenGL делает ортографическую проекцию на квадрат $[-1, 1]^2$ в плоскости XY параллельно оси Z
- ▶ Камера находится в начале координат
- ▶ Если ко всему виртуальному миру (включая камеру!) применить аффинное преобразование, изображение не изменится
- ▶ \Rightarrow Если наша камера получена аффинным преобразованием из стандартной камеры OpenGL, к объектам мира нужно применить обратное преобразование

Ортографическая проекция



Ортографическая проекция: общий случай

- ▶ В общем случае ортографическую камеру можно задать

Ортографическая проекция: общий случай

- ▶ В общем случае ортографическую камеру можно задать
 - ▶ Положением камеры $C = (C_x, C_y, C_z)$

Ортографическая проекция: общий случай

- ▶ В общем случае ортографическую камеру можно задать
 - ▶ Положением камеры $C = (C_x, C_y, C_z)$
 - ▶ Осями координат камеры
 $X = (X_x, X_y, X_z), Y = (Y_x, Y_y, Y_z), Z = (Z_x, Z_y, Z_z)$

Ортографическая проекция: общий случай

- ▶ В общем случае ортографическую камеру можно задать
 - ▶ Положением камеры $C = (C_x, C_y, C_z)$
 - ▶ Осями координат камеры
 $X = (X_x, X_y, X_z), Y = (Y_x, Y_y, Y_z), Z = (Z_x, Z_y, Z_z)$
- ▶ Делает проекцию параллельно вектору Z на параллелограмм $C \pm X \pm Y$
- ▶ Параллелограмм отождествляется с экраном

Ортографическая проекция: общий случай

- ▶ В общем случае ортографическую камеру можно задать
 - ▶ Положением камеры $C = (C_x, C_y, C_z)$
 - ▶ Осями координат камеры
 $X = (X_x, X_y, X_z), Y = (Y_x, Y_y, Y_z), Z = (Z_x, Z_y, Z_z)$
- ▶ Делает проекцию параллельно вектору Z на параллелограмм $C \pm X \pm Y$
- ▶ Параллелограмм отождествляется с экраном
- ▶ Обычно X, Y, Z взаимно ортогональны

Ортографическая проекция: общий случай

- ▶ В общем случае ортографическую камеру можно задать
 - ▶ Положением камеры $C = (C_x, C_y, C_z)$
 - ▶ Осями координат камеры
 $X = (X_x, X_y, X_z), Y = (Y_x, Y_y, Y_z), Z = (Z_x, Z_y, Z_z)$
- ▶ Делает проекцию параллельно вектору Z на параллелограмм $C \pm X \pm Y$
- ▶ Параллелограмм отождествляется с экраном
- ▶ Обычно X, Y, Z взаимно ортогональны
- ▶ Как выразить эту проекцию матрицей?

Ортографическая проекция: общий случай

- ▶ В общем случае ортографическую камеру можно задать
 - ▶ Положением камеры $C = (C_x, C_y, C_z)$
 - ▶ Осями координат камеры
 $X = (X_x, X_y, X_z), Y = (Y_x, Y_y, Y_z), Z = (Z_x, Z_y, Z_z)$
- ▶ Делает проекцию параллельно вектору Z на параллелограмм $C \pm X \pm Y$
- ▶ Параллелограмм отождествляется с экраном
- ▶ Обычно X, Y, Z взаимно ортогональны
- ▶ Как выразить эту проекцию матрицей?
- ▶ Преобразование из стандартной системы координат OpenGL $[-1, 1]^3$ в координаты области, видимой через эту камеру: смена системы координат + параллельный перенос

$$\begin{pmatrix} X_x & Y_x & Z_x & C_x \\ X_y & Y_y & Z_y & C_y \\ X_z & Y_z & Z_z & C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ортографическая проекция: общий случай

- ▶ В общем случае ортографическую камеру можно задать
 - ▶ Положением камеры $C = (C_x, C_y, C_z)$
 - ▶ Осями координат камеры
 $X = (X_x, X_y, X_z), Y = (Y_x, Y_y, Y_z), Z = (Z_x, Z_y, Z_z)$
- ▶ Делает проекцию параллельно вектору Z на параллелограмм $C \pm X \pm Y$
- ▶ Параллелограмм отождествляется с экраном
- ▶ Обычно X, Y, Z взаимно ортогональны
- ▶ Как выразить эту проекцию матрицей?
- ▶ Преобразование из стандартной системы координат OpenGL $[-1, 1]^3$ в координаты области, видимой через эту камеру: смена системы координат + параллельный перенос

$$\begin{pmatrix} X_x & Y_x & Z_x & C_x \\ X_y & Y_y & Z_y & C_y \\ X_z & Y_z & Z_z & C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- ▶ Обратное преобразование (проекция) - обратная матрица

Ортографическая проекция: общий случай

- ▶ Можно представить X, Y, Z как произведение длины и нормированного вектора:

$$X = W \cdot \hat{X} \quad Y = H \cdot \hat{Y} \quad Z = D \cdot \hat{Z}$$

Ортографическая проекция: общий случай

- Можно представить X, Y, Z как произведение длины и нормированного вектора:

$$X = W \cdot \hat{X} \quad Y = H \cdot \hat{Y} \quad Z = D \cdot \hat{Z}$$

- Матрицу можно разбить на перенос, масштабирование и поворот

$$\begin{pmatrix} X_x & Y_x & Z_x & C_x \\ X_y & Y_y & Z_y & C_y \\ X_z & Y_z & Z_z & C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & C_x \\ 0 & 1 & 0 & C_y \\ 0 & 0 & 1 & C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{X}_x & \hat{Y}_x & \hat{Z}_x & 0 \\ \hat{X}_y & \hat{Y}_y & \hat{Z}_y & 0 \\ \hat{X}_z & \hat{Y}_z & \hat{Z}_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} W & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ортографическая проекция: общий случай

- Тогда обратная матрица (матрица проекции):

$$\begin{pmatrix} X_x & Y_x & Z_x & C_x \\ X_y & Y_y & Z_y & C_y \\ X_z & Y_z & Z_z & C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{W} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{H} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{D} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{X}_x & \hat{Y}_x & \hat{Z}_x & 0 \\ \hat{X}_y & \hat{Y}_y & \hat{Z}_y & 0 \\ \hat{X}_z & \hat{Y}_z & \hat{Z}_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -C_x \\ 0 & 1 & 0 & -C_y \\ 0 & 0 & 1 & -C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ортографическая проекция: ортогональный случай

- Если X, Y, Z ортогональны, то

$$\begin{pmatrix} \hat{X}_x & \hat{Y}_x & \hat{Z}_x & 0 \\ \hat{X}_y & \hat{Y}_y & \hat{Z}_y & 0 \\ \hat{X}_z & \hat{Y}_z & \hat{Z}_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \hat{X}_x & \hat{Y}_x & \hat{Z}_x & 0 \\ \hat{X}_y & \hat{Y}_y & \hat{Z}_y & 0 \\ \hat{X}_z & \hat{Y}_z & \hat{Z}_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T =$$
$$\begin{pmatrix} \hat{X}_x & \hat{X}_y & \hat{X}_z & 0 \\ \hat{Y}_x & \hat{Y}_y & \hat{Y}_z & 0 \\ \hat{Z}_x & \hat{Z}_y & \hat{Z}_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ортографическая проекция: применение

Ортографическая проекция: применение

- ▶ 2D рендеринг: 2D игры, UI, карты

Ортографическая проекция: применение

- ▶ 2D рендеринг: 2D игры, UI, карты
- ▶ Проектирование моделей, зданий, деталей (вид сверху, вид сбоку, вид спереди)

Ортографическая проекция: применение

- ▶ 2D рендеринг: 2D игры, UI, карты
- ▶ Проектирование моделей, зданий, деталей (вид сверху, вид сбоку, вид спереди)
- ▶ Стилизация: 3D мир с ортографической проекцией

Ортографическая проекция: проблемы

Ортографическая проекция: проблемы

- ▶ Объекты на разном расстоянии от камеры выглядят одинаково

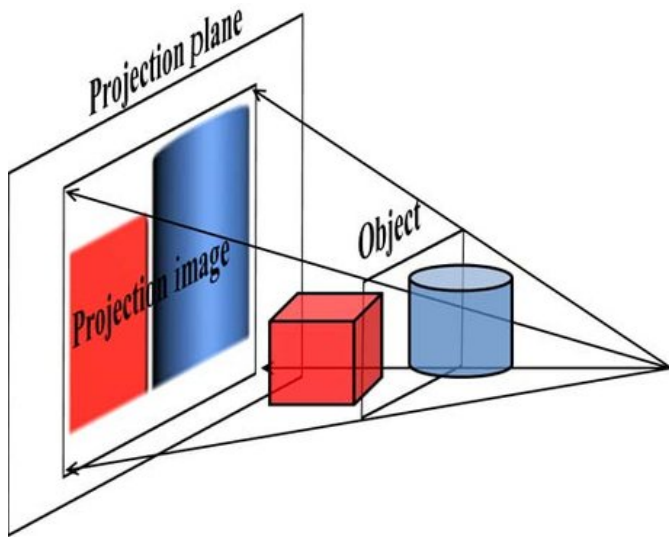
Ортографическая проекция: проблемы

- ▶ Объекты на разном расстоянии от камеры выглядят одинаково
- ▶ Нельзя оценить расстояние до объекта по его изображению

Ортографическая проекция: проблемы

- ▶ Объекты на разном расстоянии от камеры выглядят одинаково
- ▶ Нельзя оценить расстояние до объекта по его изображению
- ▶ Реальные камеры и глаза работают не так

Перспективная проекция

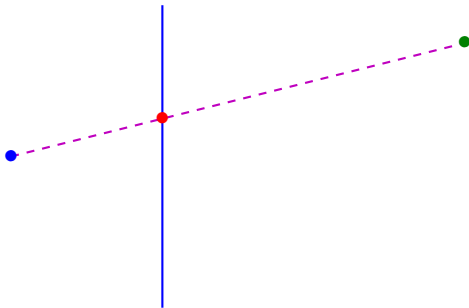


Перспективная проекция

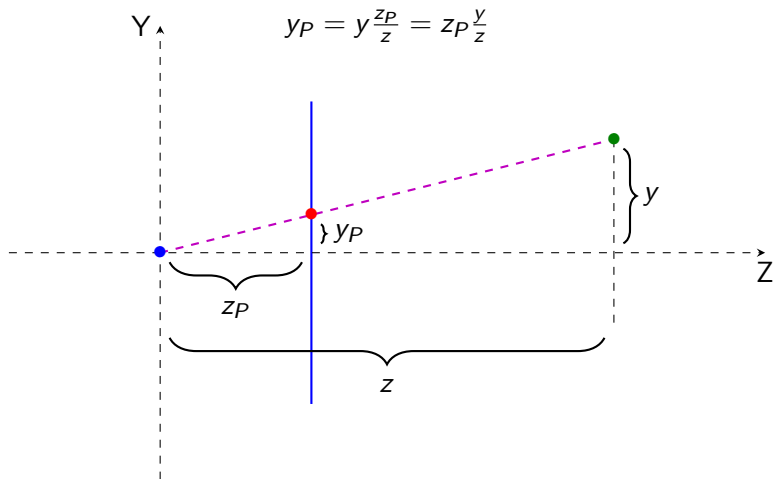
- ▶ Есть центр проекции и плоскость проекции
- ▶ Проекция точки - пересечение прямой, проходящей через эту точку и центр проекции, с плоскостью проекции

Перспективная проекция

- ▶ Есть центр проекции и плоскость проекции
- ▶ Проекция точки - пересечение прямой, проходящей через эту точку и центр проекции, с плоскостью проекции



Перспективная проекция



Перспективная проекция

- ▶ Чтобы вычислить перспективную проекцию с центром в начале координат и плоскостью проекции $Z = z_P$, нужно разделить на Z -координату:

$$(x, y, z) \mapsto (z_P \frac{x}{z}, z_P \frac{y}{z})$$

Перспективная проекция

- ▶ Чтобы вычислить перспективную проекцию с центром в начале координат и плоскостью проекции $Z = z_P$, нужно разделить на Z -координату:

$$(x, y, z) \mapsto (z_P \frac{x}{z}, z_P \frac{y}{z})$$

- ▶ Как выразить эту проекцию матрицей?

Перспективная проекция

- ▶ Чтобы вычислить перспективную проекцию с центром в начале координат и плоскостью проекции $Z = z_P$, нужно разделить на Z -координату:

$$(x, y, z) \mapsto (z_P \frac{x}{z}, z_P \frac{y}{z})$$

- ▶ Как выразить эту проекцию матрицей? Никак: матрицы не умеют делить одни координаты на другие

Perspective divide

- ▶ Чтобы поддержать перспективную проекцию, в графическом конвейере (после вершинного шейдера, перед переводом в экранные координаты) есть специальный обязательный шаг: perspective divide

Perspective divide

- ▶ Чтобы поддержать перспективную проекцию, в графическом конвейере (после вершинного шейдера, перед переводом в экранные координаты) есть специальный обязательный шаг: perspective divide
- ▶ `gl_Position` делится на последнюю координату `gl_Position.w`

$$(x, y, z, w) \mapsto \left(\frac{x}{w}, \frac{y}{w}, \frac{z}{w}\right)$$

Perspective divide

- ▶ Чтобы поддержать перспективную проекцию, в графическом конвейере (после вершинного шейдера, перед переводом в экранные координаты) есть специальный обязательный шаг: perspective divide
- ▶ `gl_Position` делится на последнюю координату `gl_Position.w`

$$(x, y, z, w) \mapsto \left(\frac{x}{w}, \frac{y}{w}, \frac{z}{w}\right)$$

- ▶ Если $w = 1$, ничего не меняется (ортогографическая проекция)

Perspective divide

- ▶ Чтобы поддержать перспективную проекцию, в графическом конвейере (после вершинного шейдера, перед переводом в экранные координаты) есть специальный обязательный шаг: perspective divide
- ▶ `gl_Position` делится на последнюю координату `gl_Position.w`

$$(x, y, z, w) \mapsto \left(\frac{x}{w}, \frac{y}{w}, \frac{z}{w}\right)$$

- ▶ Если $w = 1$, ничего не меняется (ортографическая проекция)
- ▶ Если $w =$ расстояние до камеры, получается перспективная проекция

Перспективная проекция

- ▶ Как выразить перспективную проекцию матрицей с последующим perspective divide?

Перспективная проекция

- ▶ Как выразить перспективную проекцию матрицей с последующим perspective divide?

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ z \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} x/z \\ y/z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Перспективная проекция

- ▶ Как выразить перспективную проекцию матрицей с последующим perspective divide?

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ z \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} x/z \\ y/z \\ 1 \end{pmatrix}$$

- ▶ Обычно матрица перспективной проекции выглядит не так

Наложение объектов

- ▶ По умолчанию примитивы, рисуемые позже, накладываются поверх уже нарисованных

Наложение объектов

- ▶ По умолчанию примитивы, рисуемые позже, накладываются поверх уже нарисованных
- ▶ Обычно не проблема в 2D рендеринге: рисуем слои в нужном порядке

Наложение объектов

- ▶ По умолчанию примитивы, рисующиеся позже, накладываются поверх уже нарисованных
- ▶ Обычно не проблема в 2D рендеринге: рисуем слои в нужном порядке
 - ▶ 2D игра-платформер: фон, потом ландшафт, потом персонажи, потом эффекты

Наложение объектов

- ▶ По умолчанию примитивы, рисующиеся позже, накладываются поверх уже нарисованных
- ▶ Обычно не проблема в 2D рендеринге: рисуем слои в нужном порядке
 - ▶ 2D игра-платформер: фон, потом ландшафт, потом персонажи, потом эффекты
 - ▶ Карта: ландшафт, потом дороги и здания, потом иконки заведений

Наложение объектов

- ▶ По умолчанию примитивы, рисующиеся позже, накладываются поверх уже нарисованных
- ▶ Обычно не проблема в 2D рендеринге: рисуем слои в нужном порядке
 - ▶ 2D игра-платформер: фон, потом ландшафт, потом персонажи, потом эффекты
 - ▶ Карта: ландшафт, потом дороги и здания, потом иконки заведений
 - ▶ UI: фон виджета, потом рисунок кнопки, потом текст кнопки

Наложение объектов

- ▶ По умолчанию примитивы, рисующиеся позже, накладываются поверх уже нарисованных
- ▶ Обычно не проблема в 2D рендеринге: рисуем слои в нужном порядке
 - ▶ 2D игра-платформер: фон, потом ландшафт, потом персонажи, потом эффекты
 - ▶ Карта: ландшафт, потом дороги и здания, потом иконки заведений
 - ▶ UI: фон виджета, потом рисунок кнопки, потом текст кнопки
- ▶ В 3D можно сортировать треугольники в порядке убывания расстояния до камеры (painter's algorithm), но это очень медленно:

Наложение объектов

- ▶ По умолчанию примитивы, рисующиеся позже, накладываются поверх уже нарисованных
- ▶ Обычно не проблема в 2D рендеринге: рисуем слои в нужном порядке
 - ▶ 2D игра-платформер: фон, потом ландшафт, потом персонажи, потом эффекты
 - ▶ Карта: ландшафт, потом дороги и здания, потом иконки заведений
 - ▶ UI: фон виджета, потом рисунок кнопки, потом текст кнопки
- ▶ В 3D можно сортировать треугольники в порядке убывания расстояния до камеры (painter's algorithm), но это очень медленно:
 - ▶ Нужно отсортировать миллионы треугольников каждый кадр

Наложение объектов

- ▶ По умолчанию примитивы, рисующиеся позже, накладываются поверх уже нарисованных
- ▶ Обычно не проблема в 2D рендеринге: рисуем слои в нужном порядке
 - ▶ 2D игра-платформер: фон, потом ландшафт, потом персонажи, потом эффекты
 - ▶ Карта: ландшафт, потом дороги и здания, потом иконки заведений
 - ▶ UI: фон виджета, потом рисунок кнопки, потом текст кнопки
- ▶ В 3D можно сортировать треугольники в порядке убывания расстояния до камеры (painter's algorithm), но это очень медленно:
 - ▶ Нужно отсортировать миллионы треугольников каждый кадр
 - ▶ Нужно загрузить их на GPU

Наложение объектов

- ▶ По умолчанию примитивы, рисующиеся позже, накладываются поверх уже нарисованных
- ▶ Обычно не проблема в 2D рендеринге: рисуем слои в нужном порядке
 - ▶ 2D игра-платформер: фон, потом ландшафт, потом персонажи, потом эффекты
 - ▶ Карта: ландшафт, потом дороги и здания, потом иконки заведений
 - ▶ UI: фон виджета, потом рисунок кнопки, потом текст кнопки
- ▶ В 3D можно сортировать треугольники в порядке убывания расстояния до камеры (painter's algorithm), но это очень медленно:
 - ▶ Нужно отсортировать миллионы треугольников каждый кадр
 - ▶ Нужно загрузить их на GPU
 - ▶ Треугольники одного объекта не идут непрерывно \Rightarrow больше изменений состояния (переключений шейдеров, etc) при рендеринге

Z-буфер

- ▶ Решение: буфер глубины (z-buffer)

Z-буфер

- ▶ Решение: буфер глубины (z-buffer)
- ▶ Хранит для каждого пикселя экрана расстояние до камеры

Z-буфер

- ▶ Решение: буфер глубины (z-buffer)
- ▶ Хранит для каждого пикселя экрана расстояние до камеры
- ▶ Тест глубины: при рисовании очередного пикселя (после фрагментного шейдера) проверим: если уже нарисованный пиксель ближе к камере, то новый рисовать не будем

Z-буфер

- ▶ Решение: буфер глубины (z-buffer)
- ▶ Хранит для каждого пикселя экрана расстояние до камеры
- ▶ Тест глубины: при рисовании очередного пикселя (после фрагментного шейдера) проверим: если уже нарисованный пиксель ближе к камере, то новый рисовать не будем
- ▶ Включить: `glEnable(GL_DEPTH_TEST)`

Z-буфер

- ▶ Решение: буфер глубины (z-buffer)
- ▶ Хранит для каждого пикселя экрана расстояние до камеры
- ▶ Тест глубины: при рисовании очередного пикселя (после фрагментного шейдера) проверим: если уже нарисованный пиксель ближе к камере, то новый рисовать не будем
- ▶ Включить: `glEnable(GL_DEPTH_TEST)`
- ▶ Настроить поведение теста глубины:
`glDepthFunc(GL_LEQUAL)`
 - ▶ `LEQUAL` = less or equal: пиксель рисуется, если его расстояние до камеры меньше или равно расстояния, записанного в z-буфер

Z-буфер

- ▶ К координате Z после perspective divide применяется преобразование $[-1, 1] \mapsto [0, 1]$ (т.е. $z \mapsto \frac{z+1}{2}$), и это значение записывается в z -буфер

Z-буфер

- ▶ К координате Z после perspective divide применяется преобразование $[-1, 1] \mapsto [0, 1]$ (т.е. $z \mapsto \frac{z+1}{2}$), и это значение записывается в z-буфер
 - ▶ Доступно во фрагментном шейдере: `gl_FragDepth`

Z-буфер

- ▶ К координате Z после perspective divide применяется преобразование $[-1, 1] \mapsto [0, 1]$ (т.е. $z \mapsto \frac{z+1}{2}$), и это значение записывается в z-буфер
 - ▶ Доступно во фрагментном шейдере: `gl_FragDepth`
 - ▶ Преобразование можно настроить с помощью `glDepthRange`

Z-буфер

- ▶ К координате Z после perspective divide применяется преобразование $[-1, 1] \mapsto [0, 1]$ (т.е. $z \mapsto \frac{z+1}{2}$), и это значение записывается в z-буфер
 - ▶ Доступно во фрагментном шейдере: `gl_FragDepth`
 - ▶ Преобразование можно настроить с помощью `glDepthRange`
- ▶ Z-буфер хранит или в формате unsigned normalized (16/24/32-bit), или floating-point (32-bit)
 - ▶ Обычно unsigned normalized 24-bit

Z-буфер

- ▶ К координате Z после perspective divide применяется преобразование $[-1, 1] \mapsto [0, 1]$ (т.е. $z \mapsto \frac{z+1}{2}$), и это значение записывается в z-буфер
 - ▶ Доступно во фрагментном шейдере: `gl_FragDepth`
 - ▶ Преобразование можно настроить с помощью `glDepthRange`
- ▶ Z-буфер хранит или в формате unsigned normalized (16/24/32-bit), или floating-point (32-bit)
 - ▶ Обычно unsigned normalized 24-bit
- ▶ Default framebuffer (тот, что используется по умолчанию, для рисования в окно) может иметь свой z-буфер - это нужно настраивать перед созданием контекста

Depth clipping/clamping

- ▶ Z-координата (после perspective divide) должна быть в диапазоне $[-1, 1]$

Depth clipping/clamping

- ▶ Z-координата (после perspective divide) должна быть в диапазоне $[-1, 1]$
- ▶ Что делать с вершинами, выпадающими за диапазон? Два варианта:

Depth clipping/clamping

- ▶ Z-координата (после perspective divide) должна быть в диапазоне $[-1, 1]$
- ▶ Что делать с вершинами, выпадающими за диапазон? Два варианта:
 - ▶ Depth clipping (отсечение по глубине): примитив (точка/линия/треугольник) обрезается по плоскостям $Z = \pm 1$ (как будто вне области $|Z| \leq 1$ ничего нет)

Depth clipping/clamping

- ▶ Z-координата (после perspective divide) должна быть в диапазоне $[-1, 1]$
- ▶ Что делать с вершинами, выпадающими за диапазон? Два варианта:
 - ▶ Depth clipping (отсечение по глубине): примитив (точка/линия/треугольник) обрезается по плоскостям $Z = \pm 1$ (как будто вне области $|Z| \leq 1$ ничего нет)
 - ▶ Depth clamping: отсечения не происходит, но после растеризации глубина всех пикселей сжимается до диапазона $[-1, 1]$

Depth clipping/clamping

- ▶ Z-координата (после perspective divide) должна быть в диапазоне $[-1, 1]$
- ▶ Что делать с вершинами, выпадающими за диапазон? Два варианта:
 - ▶ Depth clipping (отсечение по глубине): примитив (точка/линия/треугольник) обрезается по плоскостям $Z = \pm 1$ (как будто вне области $|Z| \leq 1$ ничего нет)
 - ▶ Depth clamping: отсечения не происходит, но после растеризации глубина всех пикселей сжимается до диапазона $[-1, 1]$
 - ▶ По умолчанию - depth clipping
 - ▶ Включить depth clamping: `glEnable(GL_DEPTH_CLAMP)`

Clipping

- ▶ На самом деле, с координатами X и Y тоже происходит отсечение

Clipping

- ▶ На самом деле, с координатами X и Y тоже происходит отсечение
- ▶ Как будто пиксели, не попадающие на экран, просто игнорируются

Clipping

- ▶ На самом деле, с координатами X и Y тоже происходит отсечение
- ▶ Как будто пиксели, не попадающие на экран, просто игнорируются
- ▶ Не настраивается

Clipping

- ▶ На самом деле, с координатами X и Y тоже происходит отсечение
- ▶ Как будто пиксели, не попадающие на экран, просто игнорируются
- ▶ Не настраивается

$$-1 \leq X \leq 1$$

$$-1 \leq Y \leq 1$$

$$-1 \leq Z \leq 1$$

Clipping

- ▶ На самом деле, с координатами X и Y тоже происходит отсечение
- ▶ Как будто пиксели, не попадающие на экран, просто игнорируются
- ▶ Не настраивается

$$-1 \leq X \leq 1$$

$$-1 \leq Y \leq 1$$

$$-1 \leq Z \leq 1$$

- ▶ С учётом perspective divide (если $W > 0$):

$$-1 \leq X/W \leq 1 \quad -W \leq X \leq W$$

$$-1 \leq Y/W \leq 1 \Leftrightarrow -W \leq Y \leq W$$

$$-1 \leq Z/W \leq 1 \quad -W \leq Z \leq W$$

Clipping

- ▶ На самом деле, с координатами X и Y тоже происходит отсечение
- ▶ Как будто пиксели, не попадающие на экран, просто игнорируются
- ▶ Не настраивается

$$-1 \leq X \leq 1$$

$$-1 \leq Y \leq 1$$

$$-1 \leq Z \leq 1$$

- ▶ С учётом perspective divide (если $W > 0$):

$$-1 \leq X/W \leq 1 \quad -W \leq X \leq W$$

$$-1 \leq Y/W \leq 1 \Leftrightarrow -W \leq Y \leq W$$

$$-1 \leq Z/W \leq 1 \quad -W \leq Z \leq W$$

- ▶ Если $W < 0$, точка не попадает на экран

Полный путь координат

- ▶ Входные данные: точка q_{object} в системе координат объекта (object space)

Полный путь координат

- ▶ Входные данные: точка q_{object} в системе координат объекта (object space)
- ▶ Позиционируем объект: $q_{world} = \text{Transform} \cdot q_{object}$ в мировых координатах (world space)

Полный путь координат

- ▶ Входные данные: точка q_{object} в системе координат объекта (object space)
- ▶ Позиционируем объект: $q_{world} = \text{Transform} \cdot q_{object}$ в мировых координатах (world space)
- ▶ Учитываем расположение камеры: $q_{camera} = \text{View} \cdot q_{world}$ в координатах камеры (view/camera space)

Полный путь координат

- ▶ Входные данные: точка q_{object} в системе координат объекта (object space)
- ▶ Позиционируем объект: $q_{world} = \text{Transform} \cdot q_{object}$ в мировых координатах (world space)
- ▶ Учитываем расположение камеры: $q_{camera} = \text{View} \cdot q_{world}$ в координатах камеры (view/camera space)
- ▶ Проекция камеры:
 $gl_Position = q_{clip} = \text{Projection} \cdot q_{camera}$ в clip space

Полный путь координат

- ▶ Входные данные: точка q_{object} в системе координат объекта (object space)
- ▶ Позиционируем объект: $q_{world} = \text{Transform} \cdot q_{object}$ в мировых координатах (world space)
- ▶ Учитываем расположение камеры: $q_{camera} = \text{View} \cdot q_{world}$ в координатах камеры (view/camera space)
- ▶ Проекция камеры:
 $gl_Position = q_{clip} = \text{Projection} \cdot q_{camera}$ в clip space
- ▶ Perspective divide: $q_{ndc} = xyz_{clip}/w_{clip}$ в normalized device coordinates

Полный путь координат

- ▶ Входные данные: точка q_{object} в системе координат объекта (object space)
- ▶ Позиционируем объект: $q_{world} = \text{Transform} \cdot q_{object}$ в мировых координатах (world space)
- ▶ Учитываем расположение камеры: $q_{camera} = \text{View} \cdot q_{world}$ в координатах камеры (view/camera space)
- ▶ Проекция камеры:
 $gl_Position = q_{clip} = \text{Projection} \cdot q_{camera}$ в clip space
- ▶ Perspective divide: $q_{ndc} = xyz_{clip}/w_{clip}$ в normalized device coordinates
 - ▶ x_{ndc} и y_{ndc} определяют координату на экране
 - ▶ z_{ndc} определяет глубину

Перспективная проекция: near & far clip planes

- ▶ Если записывать в w координату z , то после perspective divide $z=1$, т.е. у всех точек одинаковая глубина \Rightarrow нам нужна другая формула проекции!

Перспективная проекция: near & far clip planes

- ▶ Если записывать в w координату z , то после perspective divide $z=1$, т.е. у всех точек одинаковая глубина \Rightarrow нам нужна другая формула проекции!
- ▶ Итоговый диапазон глубин ограничен \Rightarrow нужно как-то ограничить диапазон возможных расстояний до камеры

Перспективная проекция: near & far clip planes

- ▶ Если записывать в w координату z , то после perspective divide $z=1$, т.е. у всех точек одинаковая глубина \Rightarrow нам нужна другая формула проекции!
- ▶ Итоговый диапазон глубин ограничен \Rightarrow нужно как-то ограничить диапазон возможных расстояний до камеры
- ▶ $0 < near < far < \infty$

Перспективная проекция: near & far clip planes

- ▶ Если записывать в w координату z , то после perspective divide $z=1$, т.е. у всех точек одинаковая глубина \Rightarrow нам нужна другая формула проекции!
- ▶ Итоговый диапазон глубин ограничен \Rightarrow нужно как-то ограничить диапазон возможных расстояний до камеры
- ▶ $0 < near < far < \infty$
- ▶ Хотим, чтобы диапазон $z \in [near, far]$ после применения матрицы проекции и perspective divide превратился в $[-1, 1]$

Перспективная проекция: near & far clip planes

- ▶ Хотим, чтобы диапазон $z \in [near, far]$ после применения матрицы проекции и perspective divide превратился в $[-1, 1]$

Перспективная проекция: near & far clip planes

- ▶ Хотим, чтобы диапазон $z \in [near, far]$ после применения матрицы проекции и perspective divide превратился в $[-1, 1]$

$$z \mapsto \frac{Az+B}{z}$$

$$near \mapsto \frac{A \cdot near + B}{near} = -1$$

$$far \mapsto \frac{A \cdot far + B}{far} = 1$$

Перспективная проекция: near & far clip planes

- ▶ Хотим, чтобы диапазон $z \in [near, far]$ после применения матрицы проекции и perspective divide превратился в $[-1, 1]$

$$z \mapsto \frac{Az+B}{z}$$

$$near \mapsto \frac{A \cdot near + B}{near} = -1$$

$$far \mapsto \frac{A \cdot far + B}{far} = 1$$

- ▶ Линейная система на A и B:

$$A \cdot near + B = -near \quad A = \frac{far + near}{far - near}$$

\Rightarrow

$$A \cdot far + B = far \quad B = \frac{-2far \cdot near}{far - near}$$

Перспективная проекция: матрица проекции

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A & B \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{far+near}{far-near} & \frac{-2far \cdot near}{far-near} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Перспективная проекция: правая система координат

- Обычно направление взгляда камеры выбирают не в сторону положительной оси Z , а в сторону отрицательной оси Z , чтобы получилась правая система координат

Перспективная проекция: правая система координат

- ▶ Обычно направление взгляда камеры выбирают не в сторону положительной оси Z , а в сторону отрицательной оси Z , чтобы получилась правая система координат
- ▶ $0 < -near < -far < \infty$

Перспективная проекция: правая система координат

- ▶ Обычно направление взгляда камеры выбирают не в сторону положительной оси Z , а в сторону отрицательной оси Z , чтобы получилась правая система координат
- ▶ $0 < -near < -far < \infty$
- ▶ Расстояние до камеры - не Z , а $-Z$

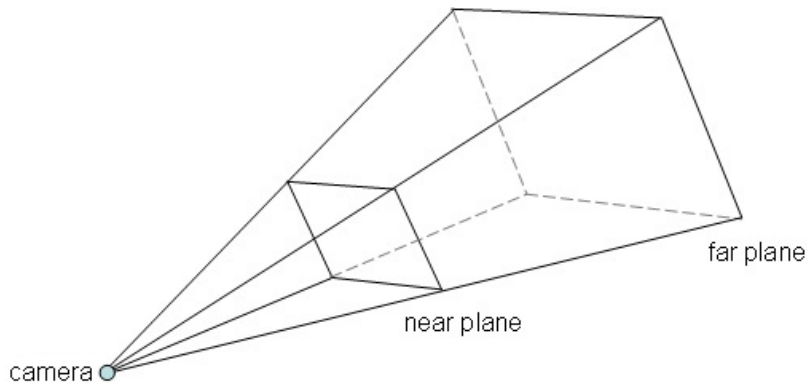
Перспективная проекция: правая система координат

- ▶ Обычно направление взгляда камеры выбирают не в сторону положительной оси Z , а в сторону отрицательной оси Z , чтобы получилась правая система координат
- ▶ $0 < -near < -far < \infty$
- ▶ Расстояние до камеры - не Z , а $-Z$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A & B \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{far+near}{far-near} & \frac{-2far \cdot near}{far-near} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Перспективная проекция: view frustum

Область, видимая перспективной камерой - усечённая пирамида (frustum)



Перспективная проекция: view frustum

Как управлять шириной и высотой видимой области?

Перспективная проекция: view frustum

Как управлять шириной и высотой видимой области?

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A & B \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

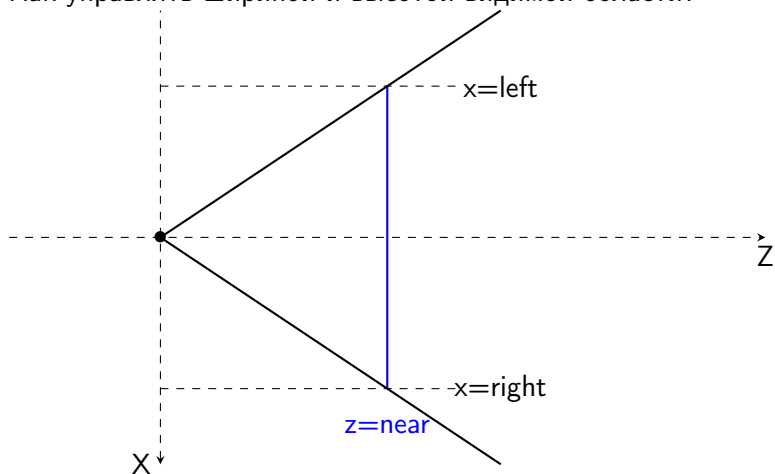
Перспективная проекция: view frustum

Как управлять шириной и высотой видимой области?

$$\begin{pmatrix} C & 0 & 0 & D \\ 0 & E & 0 & F \\ 0 & 0 & A & B \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Перспективная проекция: view frustum

Как управлять шириной и высотой видимой области?



Перспективная проекция: view frustum

Как управлять шириной и высотой видимой области?

- ▶ Обычно $\text{left} = -\text{right}$

Перспективная проекция: view frustum

Как управлять шириной и высотой видимой области?

- ▶ Обычно $\text{left} = -\text{right}$
- ▶ $\frac{-\text{left}}{\text{near}}$ - тангенс угла между осью (Z) проекции и левой границей видимой области
- ▶ $\frac{\text{right}}{\text{near}}$ - тангенс угла между осью (Z) проекции и правой границей видимой области

Перспективная проекция: view frustum

Как управлять шириной и высотой видимой области?

- ▶ Обычно $\text{left} = -\text{right}$
- ▶ $\frac{-\text{left}}{\text{near}}$ - тангенс угла между осью (Z) проекции и левой границей видимой области
- ▶ $\frac{\text{right}}{\text{near}}$ - тангенс угла между осью (Z) проекции и правой границей видимой области
- ▶ Аналогично top и bottom для Y

Перспективная проекция: view frustum

Как управлять шириной и высотой видимой области?

- ▶ Обычно $\text{left} = -\text{right}$
- ▶ $\frac{-\text{left}}{\text{near}}$ - тангенс угла между осью (Z) проекции и левой границей видимой области
- ▶ $\frac{\text{right}}{\text{near}}$ - тангенс угла между осью (Z) проекции и правой границей видимой области
- ▶ Аналогично top и bottom для Y
- ▶ Хотим, чтобы точка с координатами $X = \text{left}$ и $Z = \text{near}$ перешла (после применения матрица проекции и perspective divide) в точку с $X = -1$ и $Z = -1$
- ▶ Хотим, чтобы точка с координатами $X = \text{right}$ и $Z = \text{near}$ перешла (после применения матрица проекции и perspective divide) в точку с $X = 1$ и $Z = -1$

Перспективная проекция: view frustum

$$\begin{aligned}\frac{C \cdot \text{left} + D}{-near} &= -1 & C &= \frac{-2 \cdot near}{right - left} \\ \Rightarrow \\ \frac{C \cdot \text{right} + D}{-near} &= 1 & D &= near \cdot \frac{right + left}{right - left}\end{aligned}$$

Перспективная проекция: view frustum

$$\begin{aligned}\frac{C \cdot \text{left} + D}{-near} &= -1 & C &= \frac{-2 \cdot near}{right - left} \\ \Rightarrow \\ \frac{C \cdot \text{right} + D}{-near} &= 1 & D &= near \cdot \frac{right + left}{right - left}\end{aligned}$$

Аналогично для Y

$$\begin{aligned}\frac{E \cdot \text{bottom} + F}{-near} &= -1 & E &= \frac{-2 \cdot near}{top - bottom} \\ \Rightarrow \\ \frac{E \cdot \text{top} + F}{-near} &= 1 & F &= near \cdot \frac{top + bottom}{top - bottom}\end{aligned}$$

Перспективная проекция: матрица проекции

$$\begin{pmatrix} \frac{-2 \cdot \text{near}}{\text{right} - \text{left}} & 0 & 0 & \text{near} \cdot \frac{\text{right} + \text{left}}{\text{right} - \text{left}} \\ 0 & \frac{-2 \cdot \text{near}}{\text{top} - \text{bottom}} & 0 & \text{near} \cdot \frac{\text{top} + \text{bottom}}{\text{top} - \text{bottom}} \\ 0 & 0 & \frac{\text{far} + \text{near}}{\text{far} - \text{near}} & \frac{-2 \text{far} \cdot \text{near}}{\text{far} - \text{near}} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Перспективная проекция: матрица проекции

$$\begin{pmatrix} \frac{-2 \cdot \text{near}}{\text{right} - \text{left}} & 0 & 0 & \text{near} \cdot \frac{\text{right} + \text{left}}{\text{right} - \text{left}} \\ 0 & \frac{-2 \cdot \text{near}}{\text{top} - \text{bottom}} & 0 & \text{near} \cdot \frac{\text{top} + \text{bottom}}{\text{top} - \text{bottom}} \\ 0 & 0 & \frac{\text{far} + \text{near}}{\text{far} - \text{near}} & \frac{-2 \text{far} \cdot \text{near}}{\text{far} - \text{near}} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Часто $\text{left} = -\text{right}$ и $\text{bottom} = -\text{top}$, тогда

$$\begin{pmatrix} \frac{-\text{near}}{\text{right}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-\text{near}}{\text{top}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\text{far} + \text{near}}{\text{far} - \text{near}} & \frac{-2 \text{far} \cdot \text{near}}{\text{far} - \text{near}} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Это самый часто встречающийся вид матрицы перспективной проекции

Перспективная проекция

- ▶ Как выбирать параметры камеры?

Перспективная проекция

- ▶ Как выбирать параметры камеры?
- ▶ Пусть хотим камеру с шириной обзора по X равной θ радиан, и с aspect ratio (отношение ширины к высоте) равным R

Перспективная проекция

- ▶ Как выбирать параметры камеры?
- ▶ Пусть хотим камеру с шириной обзора по X равной θ радиан, и с aspect ratio (отношение ширины к высоте) равным R
- ▶ $-left = right = near \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$
- ▶ $-bottom = top = \frac{1}{R} \cdot right = \frac{near}{R} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$

Перспективная проекция

- ▶ Как выбирать параметры near и far?

Перспективная проекция

- ▶ Как выбирать параметры near и far?
- ▶ Всё ближе near или дальше far обрезается - почему не взять $\text{near} \approx 0$ и $\text{far} = \infty$?

Перспективная проекция

- ▶ Как выбирать параметры near и far?
- ▶ Всё ближе near или дальше far обрезается - почему не взять $\text{near} \approx 0$ и $\text{far} = \infty$?
- ▶ Ответ: ограниченная точность z-буфера
- ▶ Чем больше отношение $\frac{\text{far}}{\text{near}}$, тем меньше точности приходится на единицу расстояния

Перспективная проекция

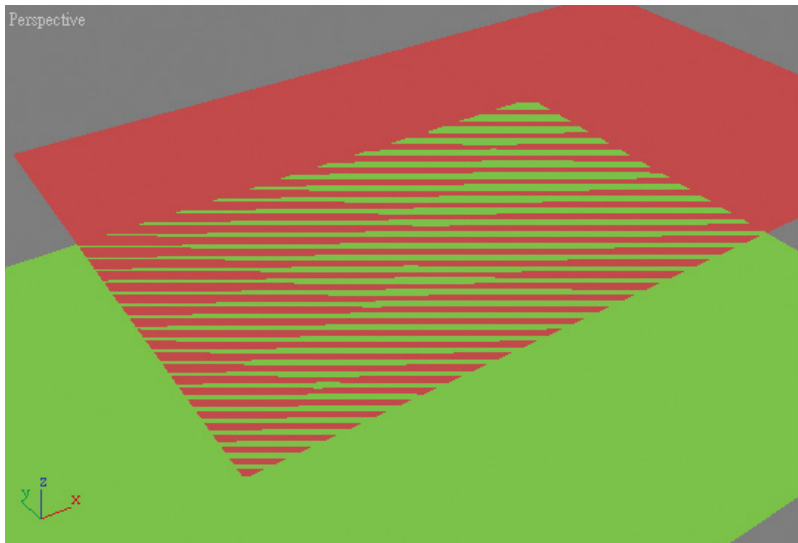
- ▶ Как выбирать параметры near и far?
- ▶ Всё ближе near или дальше far обрезается - почему не взять $\text{near} \approx 0$ и $\text{far} = \infty$?
- ▶ Ответ: ограниченная точность z-буфера
- ▶ Чем больше отношение $\frac{\text{far}}{\text{near}}$, тем меньше точности приходится на единицу расстояния
- ▶ near: максимально возможный, при котором не обрезается что-то существенное
 - ▶ При этом камера искусственно держится на некотором расстоянии от любых объектов

Перспективная проекция

- ▶ Как выбирать параметры near и far?
- ▶ Всё ближе near или дальше far обрезается - почему не взять $\text{near} \approx 0$ и $\text{far} = \infty$?
- ▶ Ответ: ограниченная точность z-буфера
- ▶ Чем больше отношение $\frac{\text{far}}{\text{near}}$, тем меньше точности приходится на единицу расстояния
- ▶ near: максимально возможный, при котором не обрезается что-то существенное
 - ▶ При этом камера искусственно держится на некотором расстоянии от любых объектов
- ▶ far: максимально возможный, при котором не возникает Z-fighting'a

Z-fighting

Ситуация, когда две очень близких почти (или полностью) параллельных плоскости рисуются с артефактом из-за недостаточной точности Z-буфера:



Перспективная проекция: матрица проекции

- ▶ Что, если мы хотим переместить и повернуть камеру?

Перспективная проекция: матрица проекции

- ▶ Что, если мы хотим переместить и повернуть камеру?
- ▶ Так же, как с ортографической проекцией: сначала применим обратное преобразование, а потом матрицу проекции

Перспективная проекция: матрица проекции

- ▶ Что, если мы хотим переместить и повернуть камеру?
- ▶ Так же, как с ортографической проекцией: сначала применим обратное преобразование, а потом матрицу проекции

$$\begin{pmatrix} C & 0 & 0 & D \\ 0 & E & 0 & F \\ 0 & 0 & A & B \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_x & Y_x & Z_x & C_x \\ X_y & Y_y & Z_y & C_y \\ X_z & Y_z & Z_z & C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1}$$

Перспективная проекция: матрица проекции

- ▶ Что, если мы хотим переместить и повернуть камеру?
- ▶ Так же, как с ортографической проекцией: сначала применим обратное преобразование, а потом матрицу проекции

$$\begin{pmatrix} C & 0 & 0 & D \\ 0 & E & 0 & F \\ 0 & 0 & A & B \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_x & Y_x & Z_x & C_x \\ X_y & Y_y & Z_y & C_y \\ X_z & Y_z & Z_z & C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1}$$

- ▶ Обычно именно эту матрицу передают в шейдер