

Синтез изображений с помощью растеризации. OpenGL

Алексей Викторович Игнатенко
Лаборатория компьютерной графики и
мультимедиа
ВМК МГУ

Лекция из трех частей: алгоритм растеризации, OpenGL, геометрические преобразования



Алгоритм синтеза изображений с помощью растеризации



OpenGL: Архитектура и основные функции

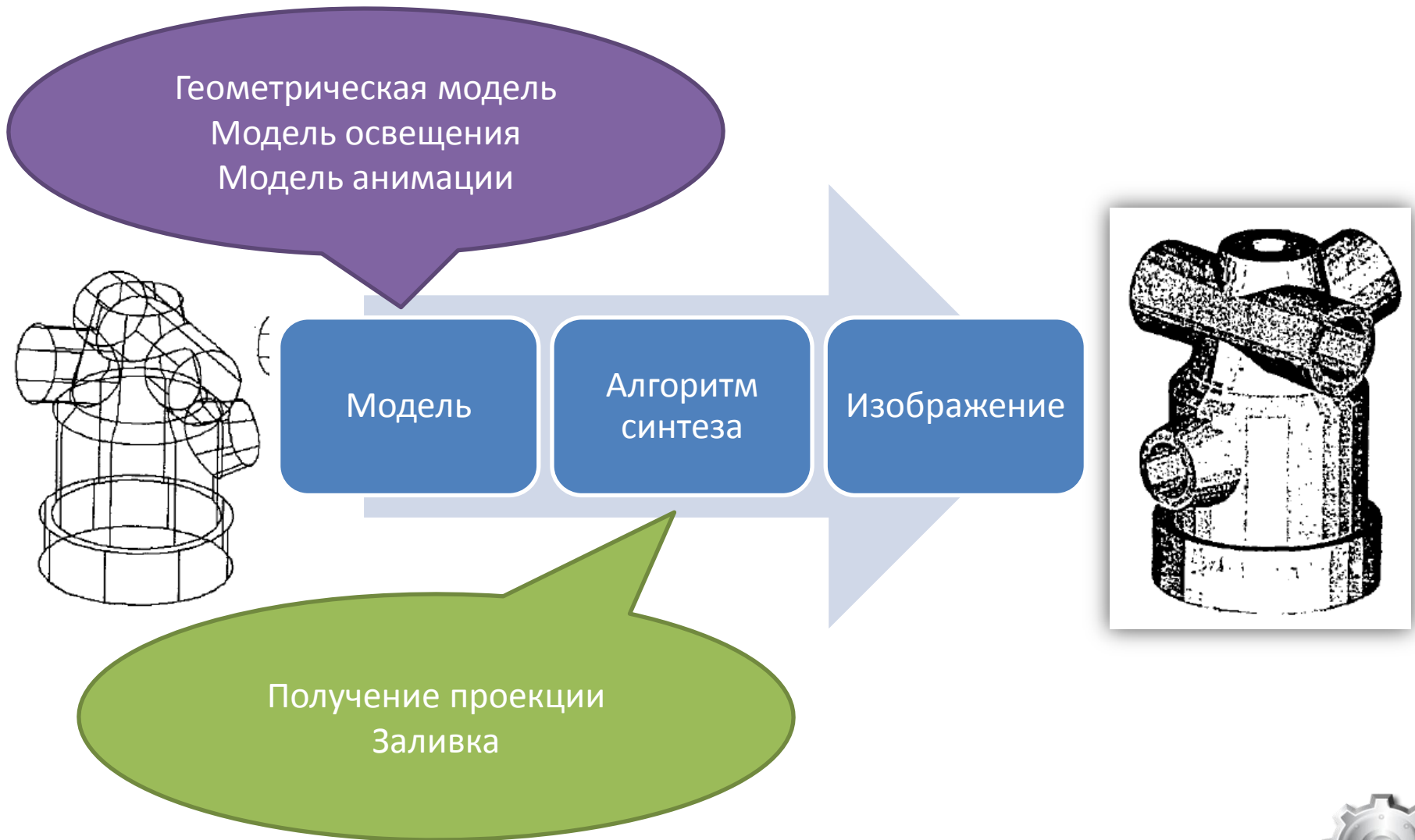


Геометрические преобразования



Геометрические преобразования в OpenGL

Графический процесс: типовая последовательность применения алгоритмов



Графический процесс: типовая последовательность применения алгоритмов



При выборе алгоритма надо выбрать между скоростью и качеством

Скорость

Качество



Растеризация



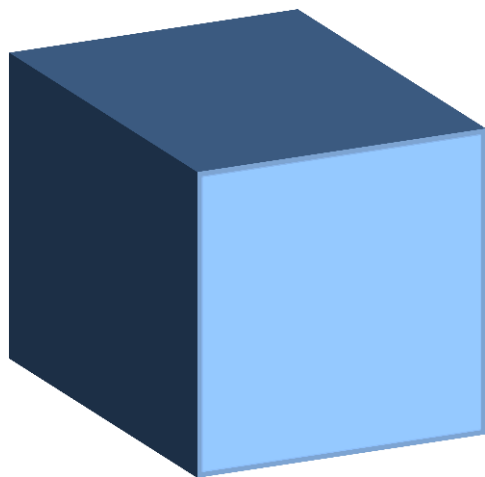
Трассировка
лучей/фотонов
Излучательность

Выбор условный! Все зависит от особенностей данных и реализации. Появление и развитие GPU сильно изменили баланс

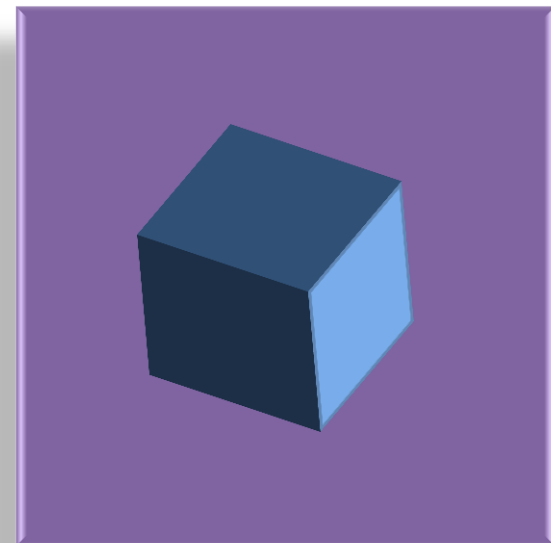
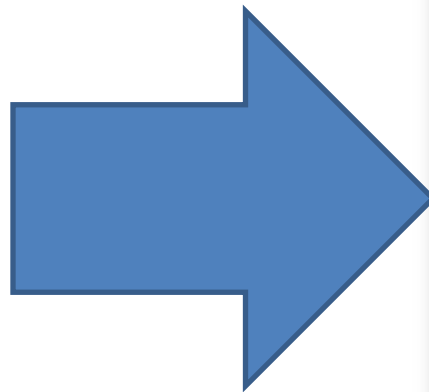
Метод растеризации работает с помощью проекции сцены на изображение

В общем случае **растеризация** – преобразование векторной информации в растровый формат

В трехмерной компьютерной графике – конкретный алгоритм синтеза изображений

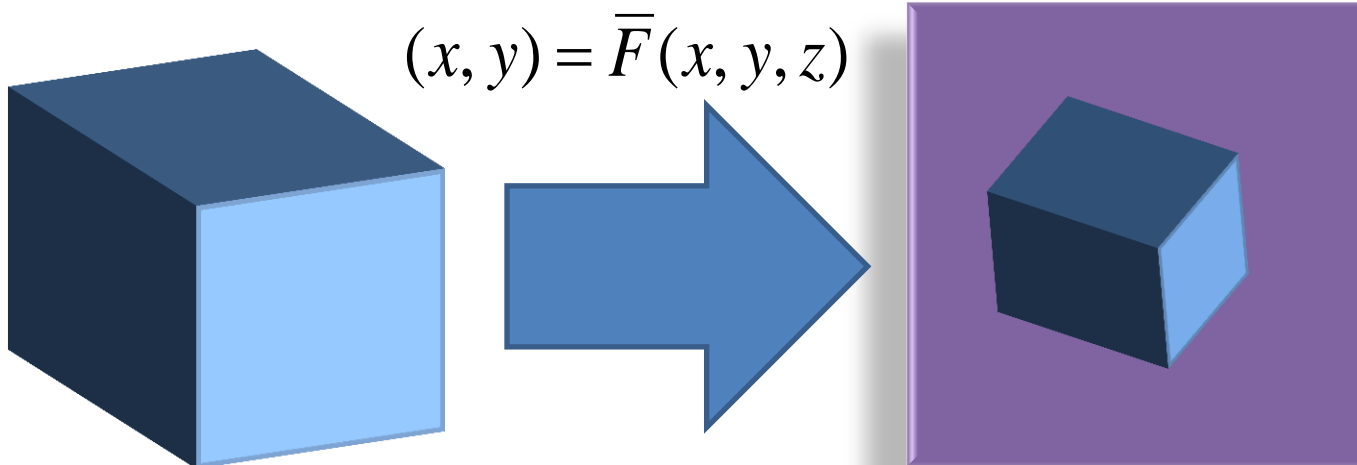


$$(x, y) = \bar{F}(x, y, z)$$



Алгоритм растеризации: функция отображения + расчет цвета пикселей

- I. Для геометрии модели задается функция отображения в двумерное пространство экрана
- II. Функция применяется к модели: определяется множество точек на экране
- III. Растеризация – отображение на пиксели
- IV. Вычисляется цвет пикселей изображения



Свойства: скорость и поддержка на уровне графических процессоров

- Широко распространен
- Аппаратная поддержка
- OpenGL, DirectX реализуют именно этот подход
- Ориентация на скорость визуализации

- Определяет только проекцию, поэтому может быть совмещен с различными подходами по вычислению цвета



Лекция из трех частей: алгоритм растеризации, OpenGL, геометрические преобразования

Алгоритм синтеза изображений с помощью растеризации

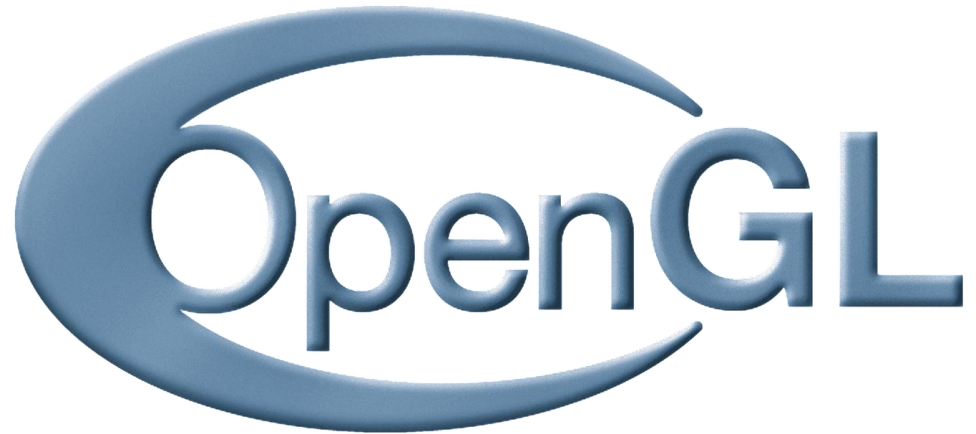
OpenGL: Архитектура и основные функции

Геометрические преобразования

Геометрические преобразования в OpenGL

OpenGL – это программная библиотека для создания 3D-приложений

OpenGL – кросс-платформенная библиотека функций для создания интерактивных 2D и 3D приложений



Является отраслевым стандартом с 1992 года. Основой стандарта стала библиотека IRIS GL, разработанная фирмой Silicon Graphics Inc.

Основная функция: интерактивная визуализация трехмерных моделей





www.**yeah** the movie.de
(c)2002 Spellcraft Studio





OpenGL проста для изучения и поэтому она выбрана для вводного курса графики

OpenGL

- Стабильность (с 1992 г.): Изменения в API вносятся комитетом ARB (Architecture Review Board)
- Переносимость: Независимость от оконной и операционной системы
- Легкость применения: простой интерфейс, низкие затраты на обучение

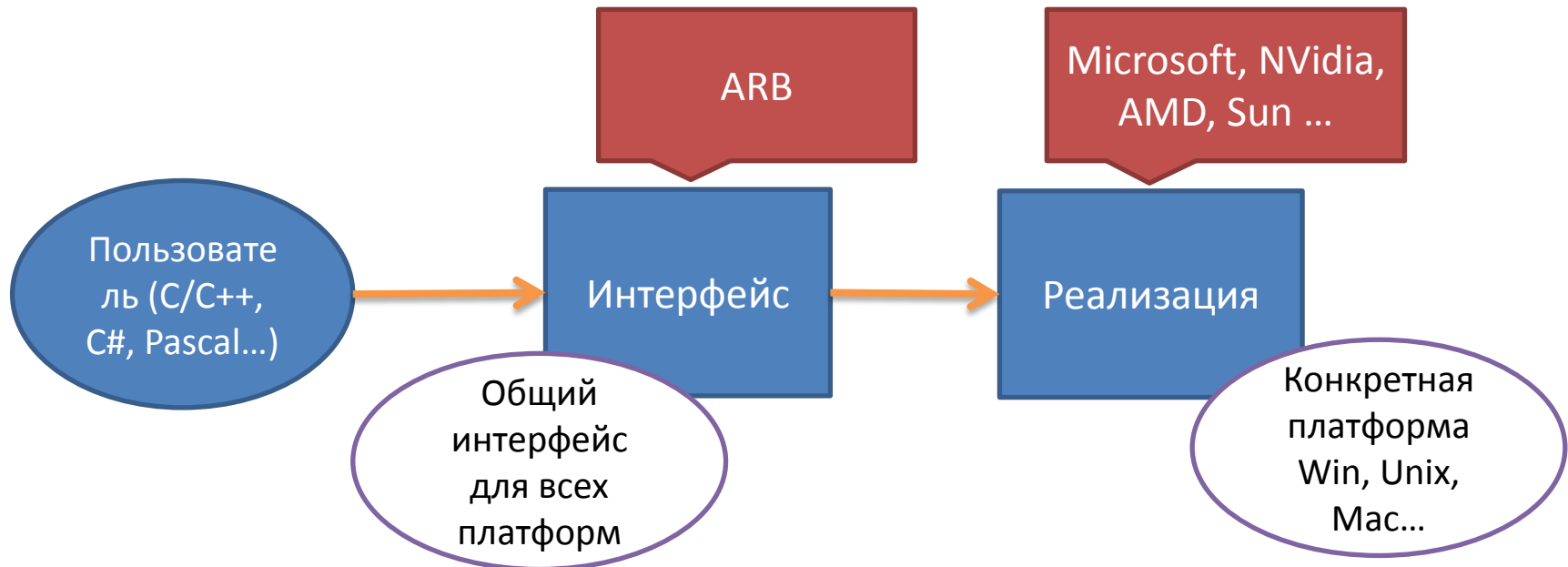
Подходит для обучения студентов!

Аналогичные библиотеки: DirectX

OpenGL – это API и реализация

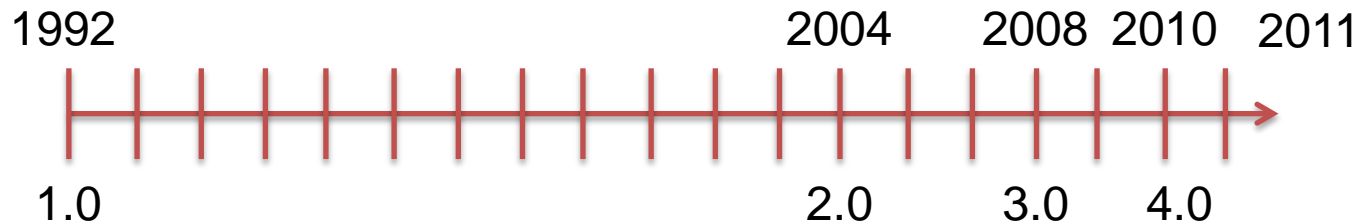
Стандартизируется прикладной программный интерфейс (API)

- Реализация своя для каждой платформы
- Может существовать несколько реализаций



История OpenGL: четыре версии за 18 лет

- 1992 1.0
- 1997 1.1
 - Текстурные объекты
 - Вершинные массивы
- 1998 1.2
 - 3D текстуры
- 2001 1.3
 - Кубические текстуры, мультитекстурирование
 - Мультисэмплинг
- 2002 1.4
- 2003 1.5
- 2004 2.0
 - Язык GLSL, поддержка шейдеров
- 2006 2.1
 - Pixel Buffer Objects
- 3.0 2008
 - Frame Buffer Objects
 - Hardware Instancing
 - Vertex Array Object
- 3.1 2009
 - Instancing
- 3.2 2009
 - Geometry Shaders
- 3.3 2010
- 4.0 2010
 - GPU Tessellation
- 4.1 2010
 - OpenGL ES Compatibility
- 4.2 2011

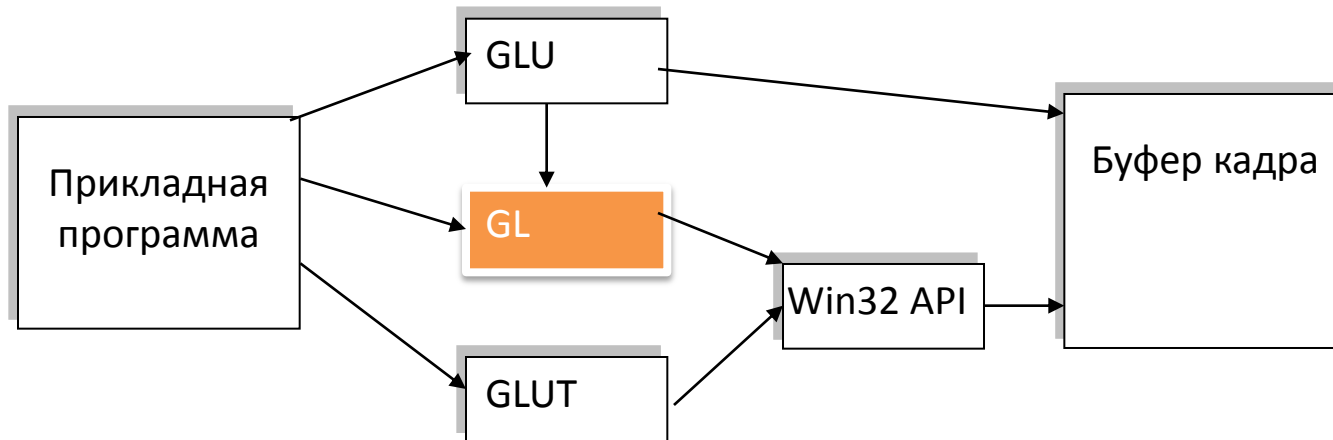


OpenGL 1.x-2.x VS OpenGL 3.x-4.x

- В OpenGL 3.x+ введен новый «непосредственный» (immediate) API
- API стал более ориентирован на программируемую аппаратуру и крупные приложения
- API версий 1.x и 2.x доступен
- В курсе в основном рассматривается API 1.x-2.x (подходит для обучения)
- Отдельная лекция по GL 3.
- Задание по выбору на программируемый конвейер

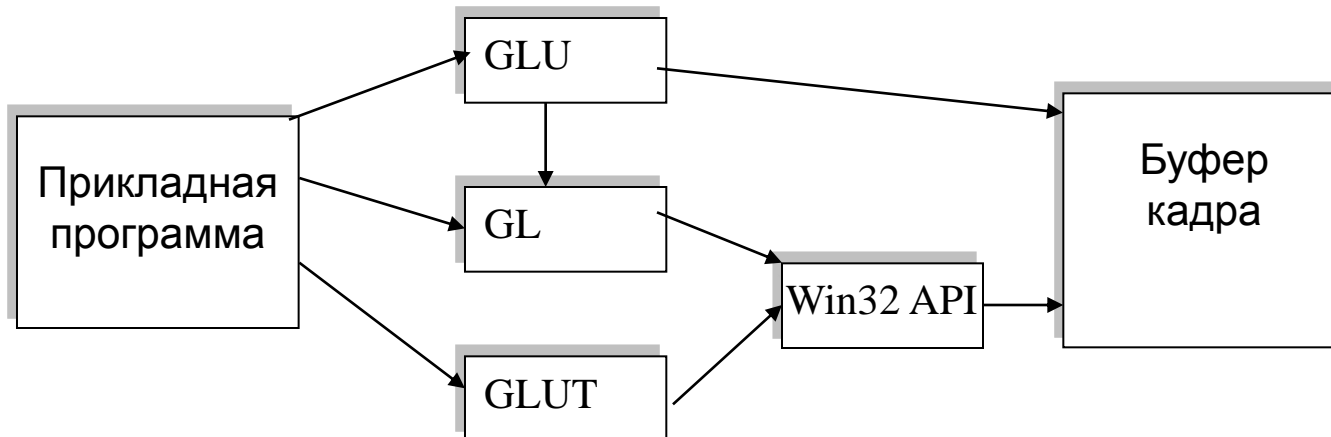
OpenGL – прослойка между вашей программой и драйвером видеокарты

Взаимодействует с пользовательскими программами, драйвером видеокарты и с WIN API

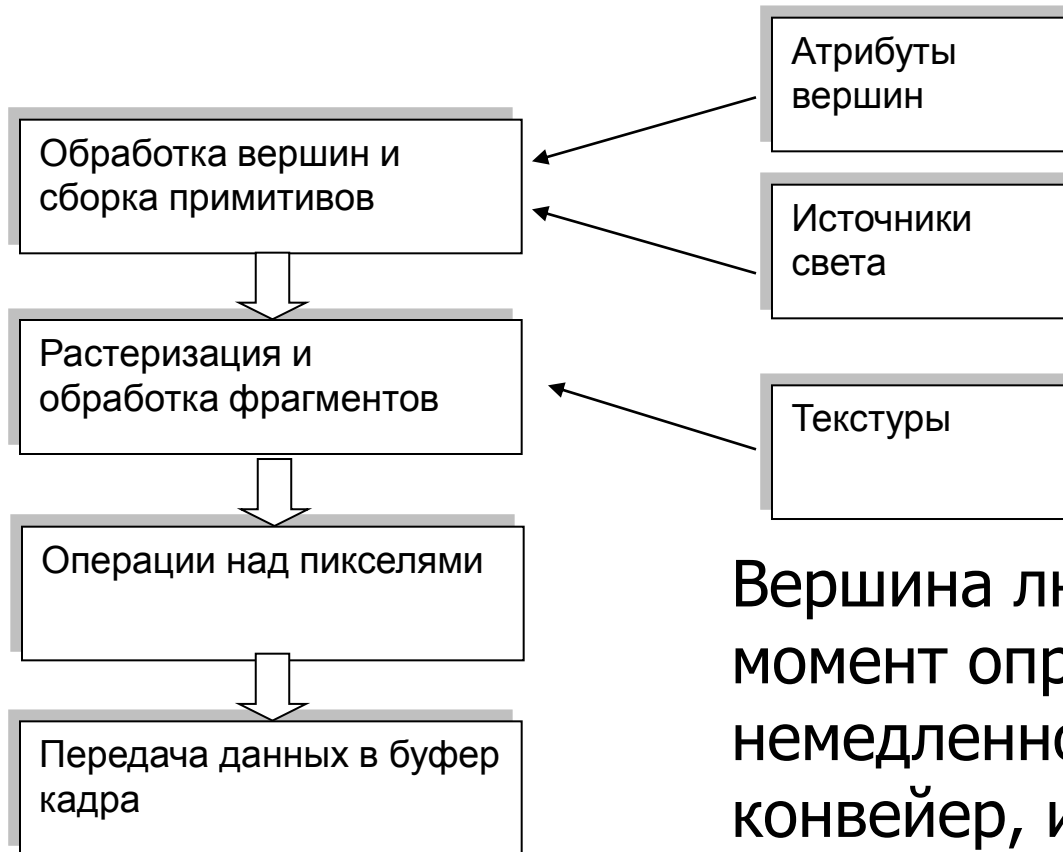


OpenGL состоит из набора библиотек

- AGL, GLX, WGL
 - Связь между OpenGL и оконной системой
 - GLU (OpenGL Utility Library)
 - Часть OpenGL
 - NURBS, tessellators, quadric shapes, etc
 - GLUT (OpenGL Utility Toolkit)
 - Переносимый оконный API
 - **Неофициальная часть OpenGL**
- Вместо GLUT можно использовать SDL и другие библиотеки**



Программная архитектура OpenGL может быть представлена в виде конвейера



Вершина любого объекта в момент определения немедленно передается в конвейер, и проходит все его ступени

3D координаты ->
экранные

Два типа функций (команд): передача данных и изменения состояния

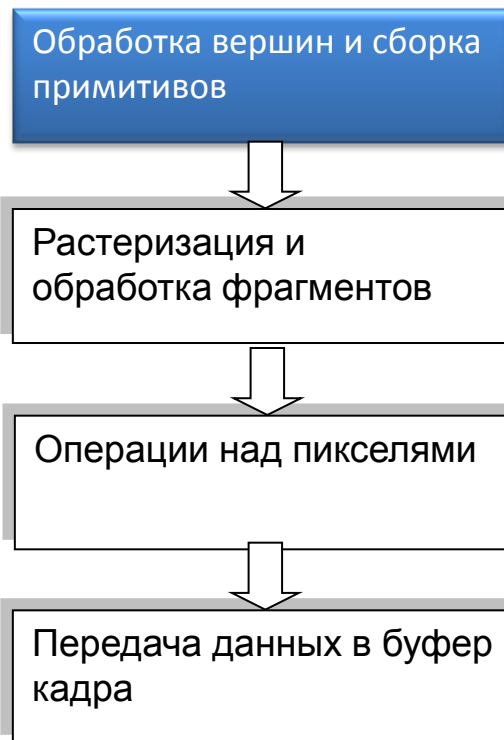
Команды передача данных

- Объекты на экране рисуются путем последовательной передачи в конвейер вершин примитивов, которые составляют объект

Команды изменения состояния

- Настройка обработки данных на каждом этапе конвейера
- OpenGL как конечный автомат

Конвейер OpenGL. Переходим к этапу обработки вершин и сборке примитивов



Конвейер OpenGL. Переходим к этапу обработки вершин и сборке примитивов



На входе:

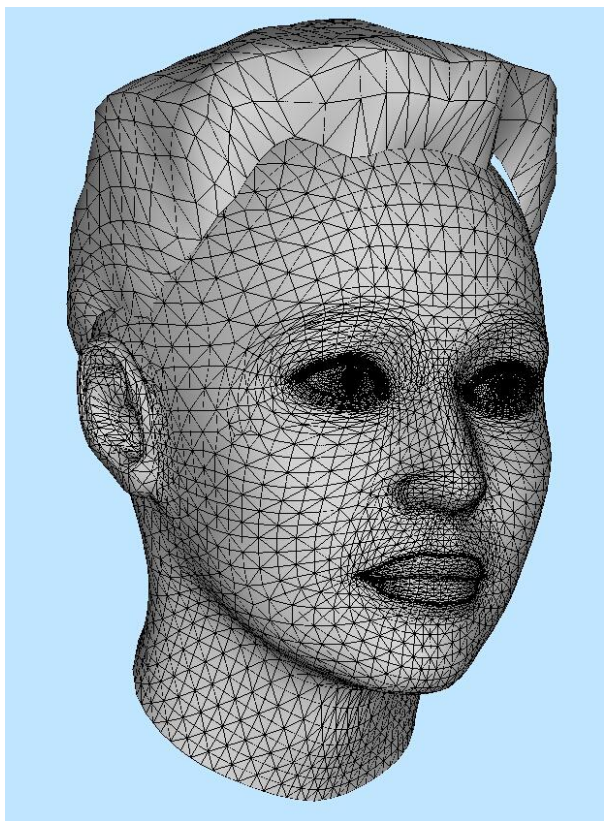
Трехмерная модель (векторный вид)

На выходе

2D-координаты примитивов модели

OpenGL работает с разными типами моделей, в основном с полигональными

OpenGL работает с моделями, заданными в граничном полигональном представлении

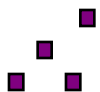


Поверхность приближается набором полигональных граней (face, polygon)

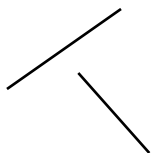
Границы граней описываются ребрами (edge)

Часть отрезка, формирующего ребро, заканчивается вершинами (vertex)

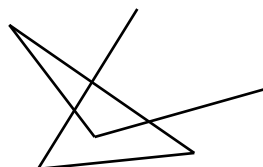
OpenGL может по-разному объединять вершины в полигоны



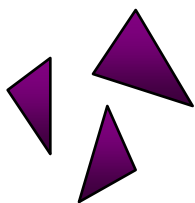
GL_POINTS



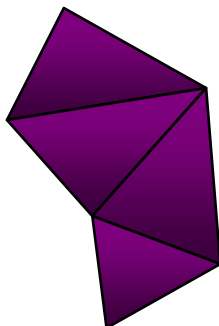
GL_LINES



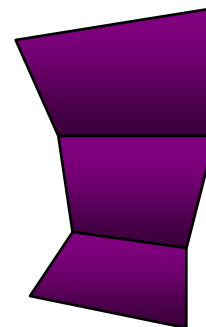
GL_LINE_STRIP



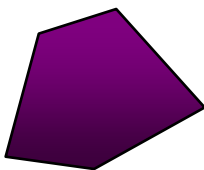
GL_TRIANGLES



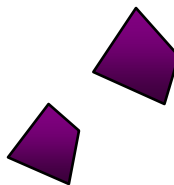
GL_TRIANGLE_STRIP



GL_QUAD_STRIP



GL_POLYGON



GL_QUADS

С каждой вершиной ассоциировано несколько атрибутов

Каждая вершина кроме положения в пространстве может иметь несколько других атрибутов

- Материал
- Цвет
- Нормаль
- Текстурные координаты

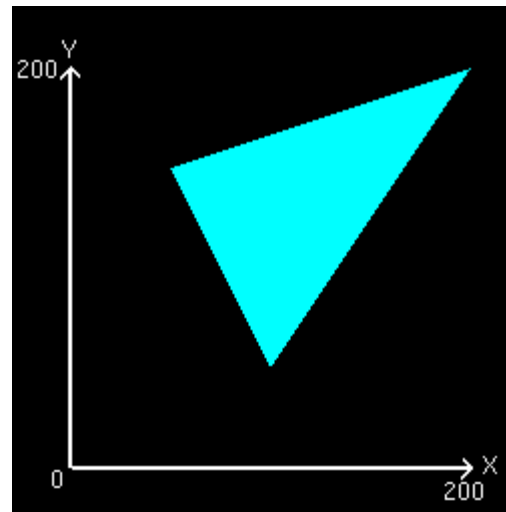
Внимание: всегда используется ТЕКУЩИЙ набор атрибутов

- OpenGL как конечный автомат

Пример кода для вывода треугольника

Цветной треугольник

- glBegin(GL_TRIANGLES);
 - glColor3f(0.0f,1.0f,0.0f);
 - glVertex2f(150.0f, 50 .0f);
 - glVertex2f(50.0f, 150 .0f);
 - glVertex2f(200 .0f, 200 .0f);
- glEnd();



Таким образом можно задать любой объект!

Теперь задача в том, чтобы правильно показать этот объект на экране

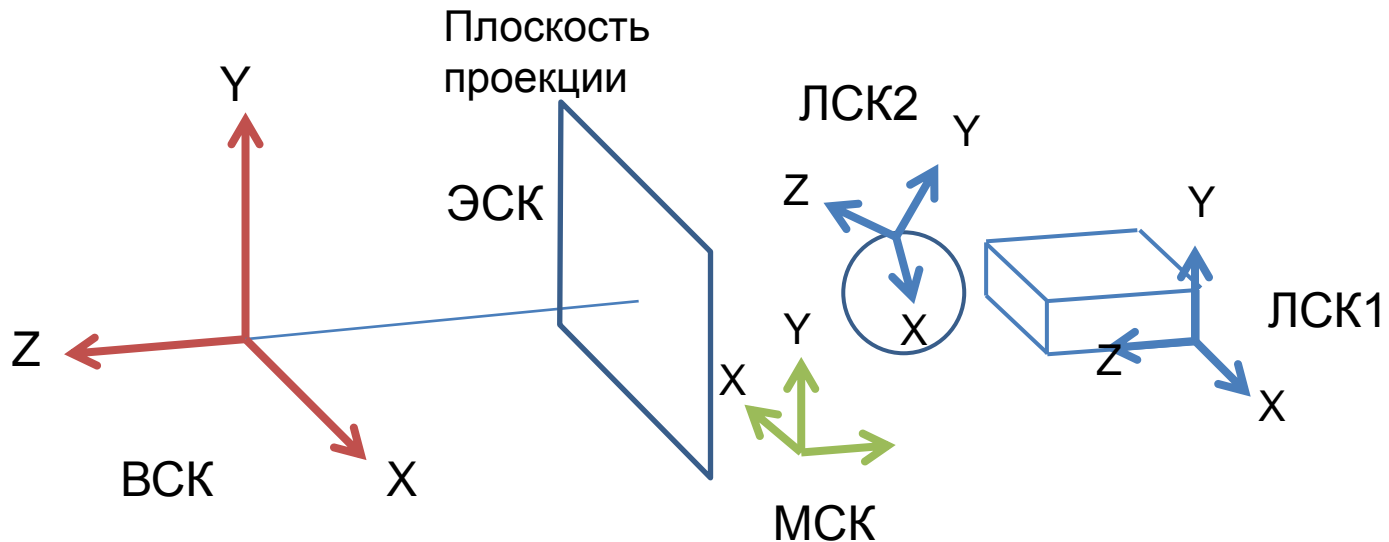
В OpenGL каждая вершина задается в локальной системе координат

- Каждая вершина объекта задается в локальных координатах модели
- Необходимо определить набор геометрических преобразований, таких, что каждая вершина преобразуется в точку на плоскости экрана

Обработка вершин: последовательность преобразований из локальной в экранную систему координат

Три последовательных преобразования:

- модельное преобразование (ЛСК -> МСК)
- видовое преобразование (МСК -> ВСК)
- проективное преобразование (ВСК -> ЭСК)



Лекция из трех частей: алгоритм растеризации, OpenGL, геометрические преобразования

Алгоритм синтеза изображений с помощью растеризации

OpenGL: Архитектура и основные функции

Геометрические преобразования

Геометрические преобразования в OpenGL

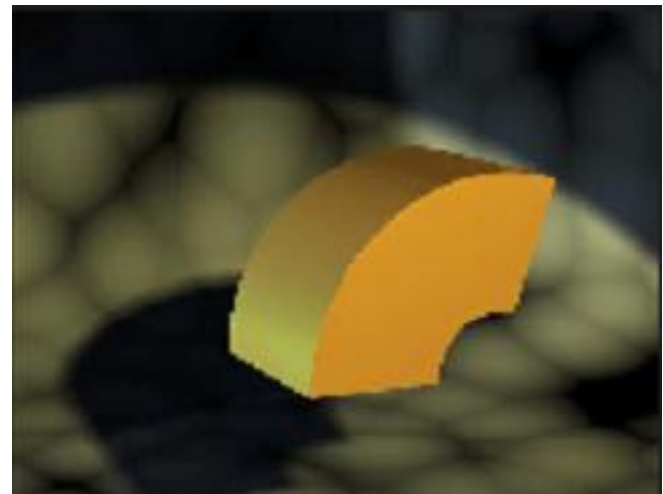
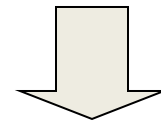
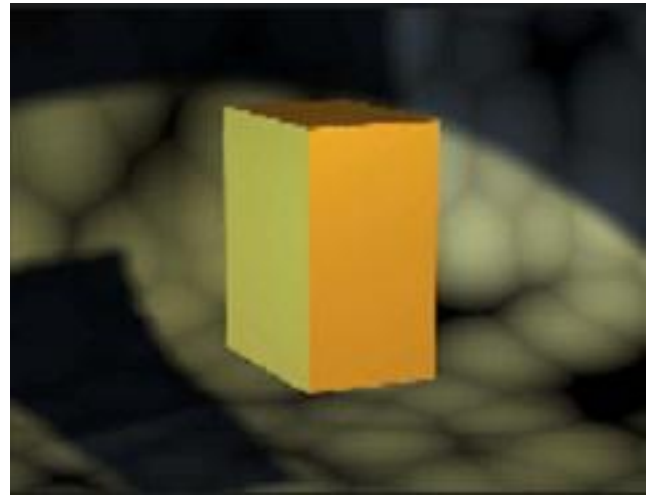
Что такое геометрические преобразования?

Модель

- Например, описание поверхности трехмерного объекта
- Некоторое подмножество точек декартова пространства

Зачем применять преобразования к модели?

- Создание моделей (сцен) из компонент
- Редактирование моделей
- Преобразования в процессе синтеза изображений



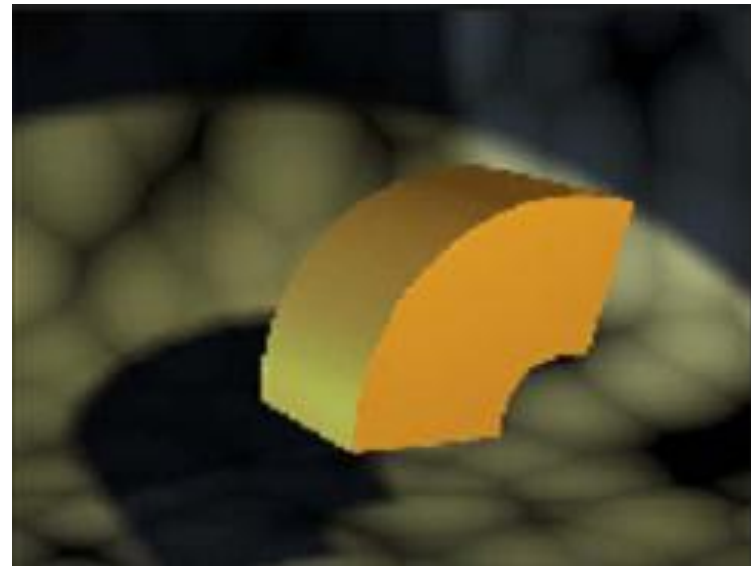
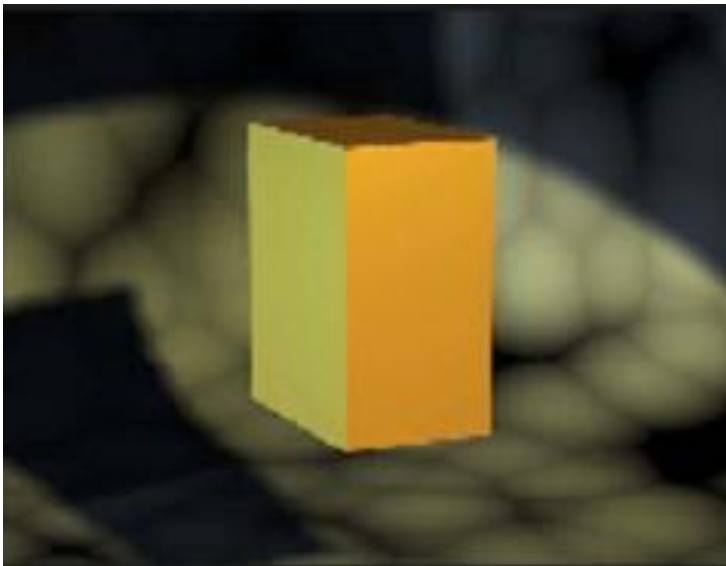
Два класса преобразований: линейные и нелинейные

- Линейные преобразования
- Нелинейные преобразования

$$x' = Ax + By + Cz + D$$

$$y' = Ex + Fy + Gz + H$$

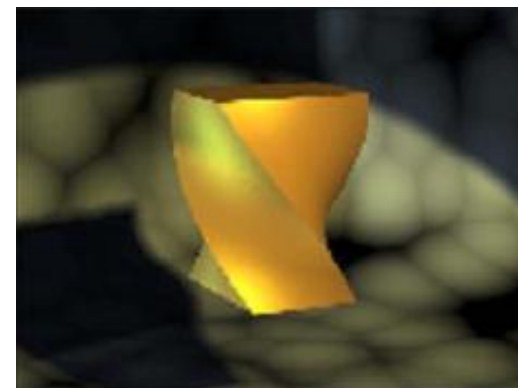
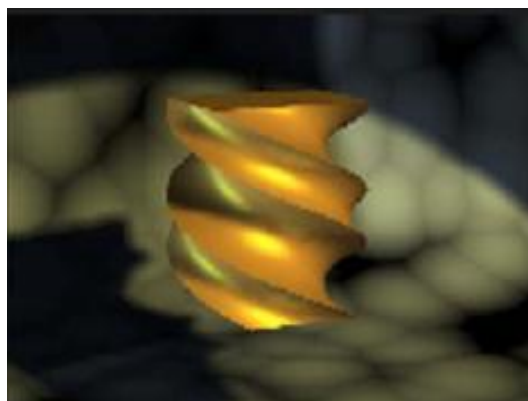
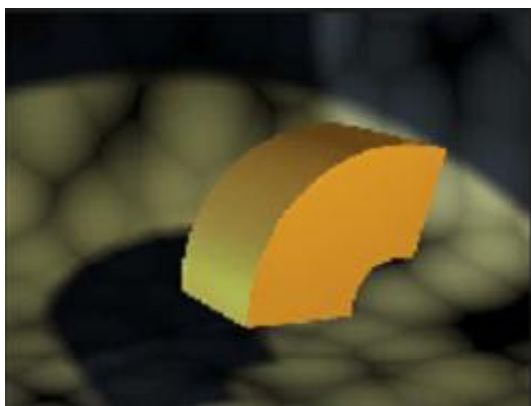
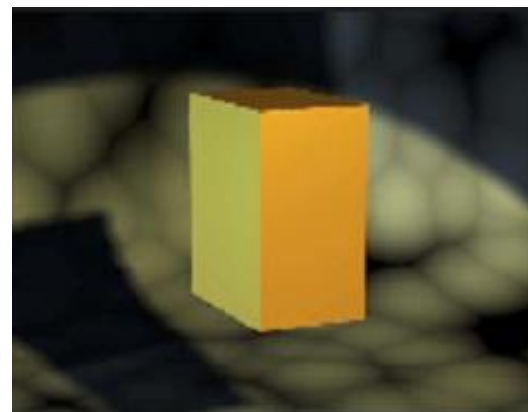
$$z' = Ix + Jy + Kz + L$$



Нелинейные преобразования – произвольные деформации модели

Произвольное
преобразование точек
модели

$$M' = T(M)$$



Линейные преобразования – интересующий нас класс преобразований

$$x' = Ax + By + Cz + D$$

$$y' = Ex + Fy + Gz + H$$

$$z' = Ix + Jy + Kz + L$$

Линейное преобразование применяется к каждой точке модели

Не изменяет топологию!

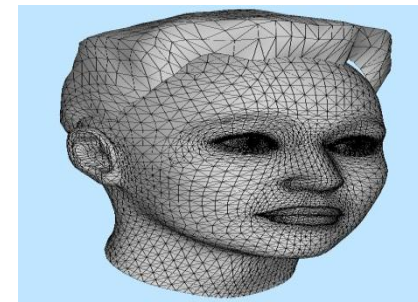
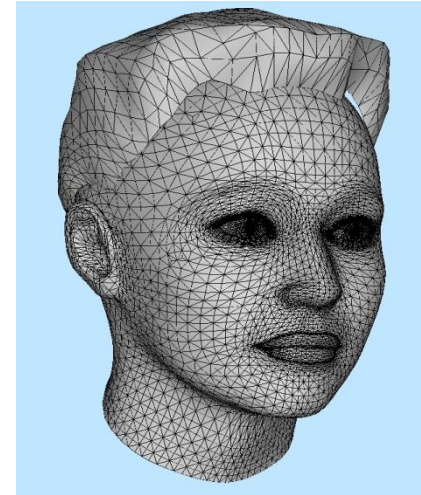
Для полигональных моделей линейные преобразования достаточно применить к вершинам!

Для полигональных моделей достаточно применить преобразование к вершинам модели!

– Линейная интерполяция

Алгоритмически эффективно,
легко векторизуется

Растеризация основана на
линейных преобразованиях

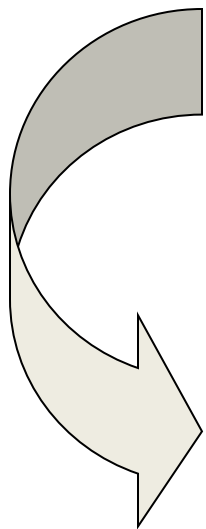


Преобразования можно записать в матричной форме

$$x' = Ax + By + Cz + D$$

$$y' = Ex + Fy + Gz + H$$

$$z' = Ix + Jy + Kz + L$$



$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & C & D \\ E & F & G & H \\ I & J & K & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

4-я координата W важна!

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & C & D \\ E & F & G & H \\ I & J & K & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

- Позволяет использовать матричную запись для всех линейных преобразований (если использовать матрицы 3×3 , невозможно представить перенос)
- Позволяет описать так называемой перспективное деление (нужно для проекции)

Типичные линейные преобразования



Общие линейные преобразования

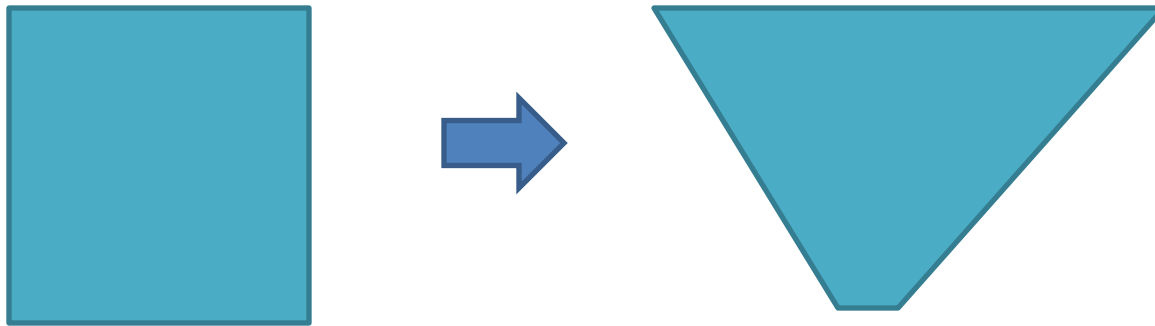
Аффинные преобразования

Преобразование подобия

Изометрические преобразования

Общие линейные преобразования – прямые в прямые

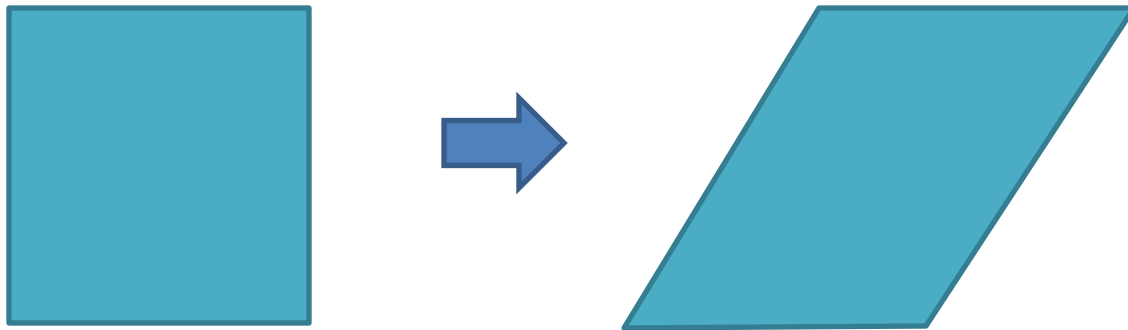
- $w \neq 1$ (после преобразования)
- Также называются проективными
- Прямые переходят в прямые



Аффинные преобразования – сохраняют параллельность

Линейные +

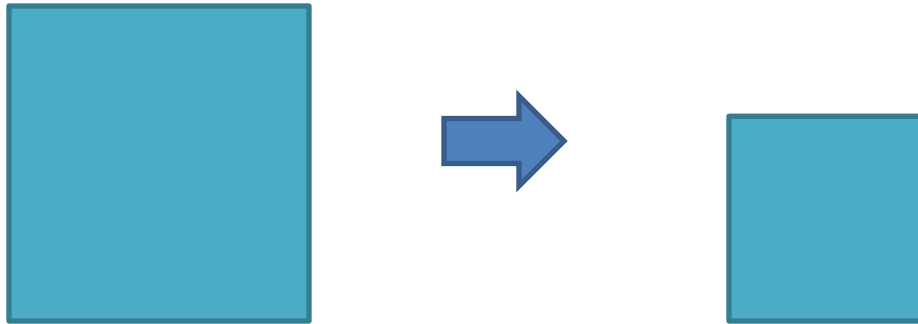
- $w = 1$
- Сохраняется параллельность линий
- Пример: сдвиг



Преобразования подобия – сохраняют углы

Аффинные +

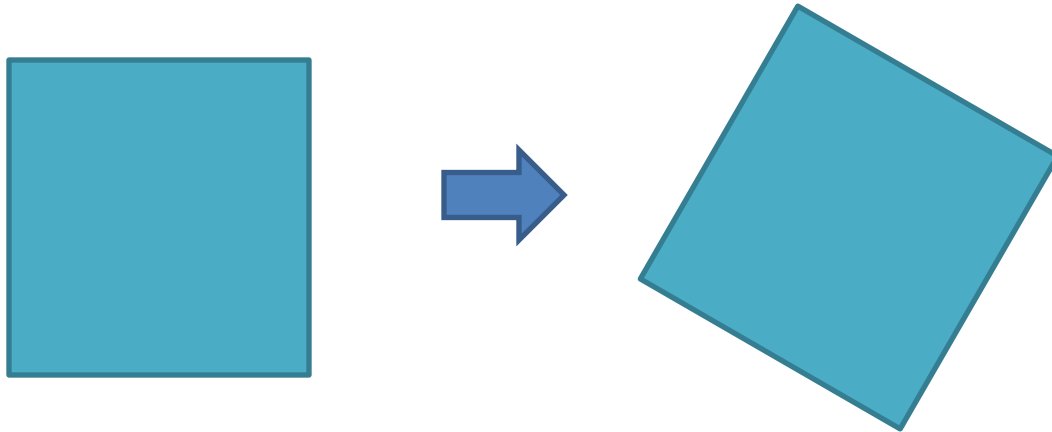
- Сохраняются углы
- Пример: равномерное масштабирование



Изометрические преобразования – сохраняют размеры

Подобия +

- Сохраняются расстояния
- Пример: поворот, перенос



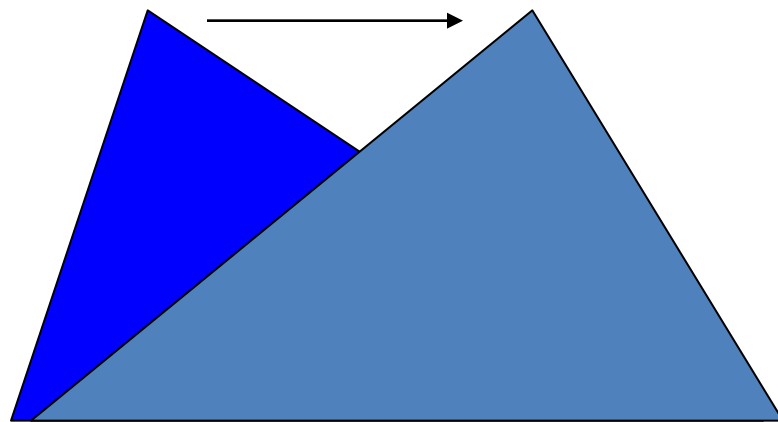
СДВИГ

$$x' = x + ay$$

$$y' = y + bx$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a & 0 & 0 \\ b & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Аффинное
преобразование



Масштабирование

$$x' = ax$$

$$y' = by$$

$$z' = cz$$

Равномерное =
преобразование подобия

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Параллельный перенос

$$x' = x + \Delta x$$

$$y' = y + \Delta y$$

$$z' = z + \Delta z$$

Изометрия

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Поворот (2D)

$$x' = x \cos \theta - y \sin \theta$$

$$y' = x \sin \theta + y \cos \theta$$

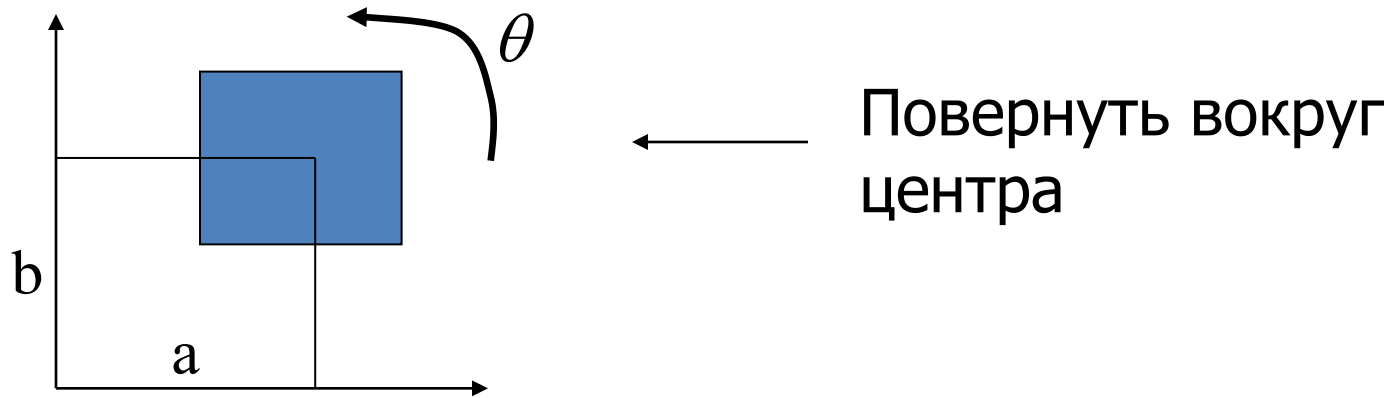
Изометрия

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Введем набор типичных преобразований и их обозначения

- Сдвиг $Sh(a,b,c)$
- Масштабирование $S(a,b,c)$
- Перенос $T(a,b,c)$
- Поворот $R(\theta)$ или $R(\text{axis}, \theta)$

Суперпозиция преобразований позволяет составлять сложные преобразования из простых



Записывать так

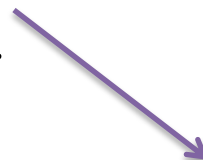
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = (T(a, b) * R(\theta) * T(-a, -b)) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Произносить так

Задача

$$x' = x + ay$$

$$y' = y + bx$$



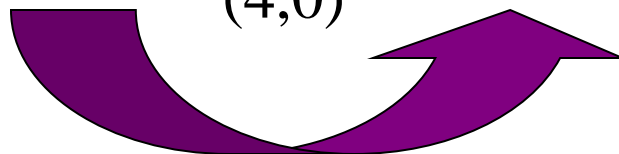
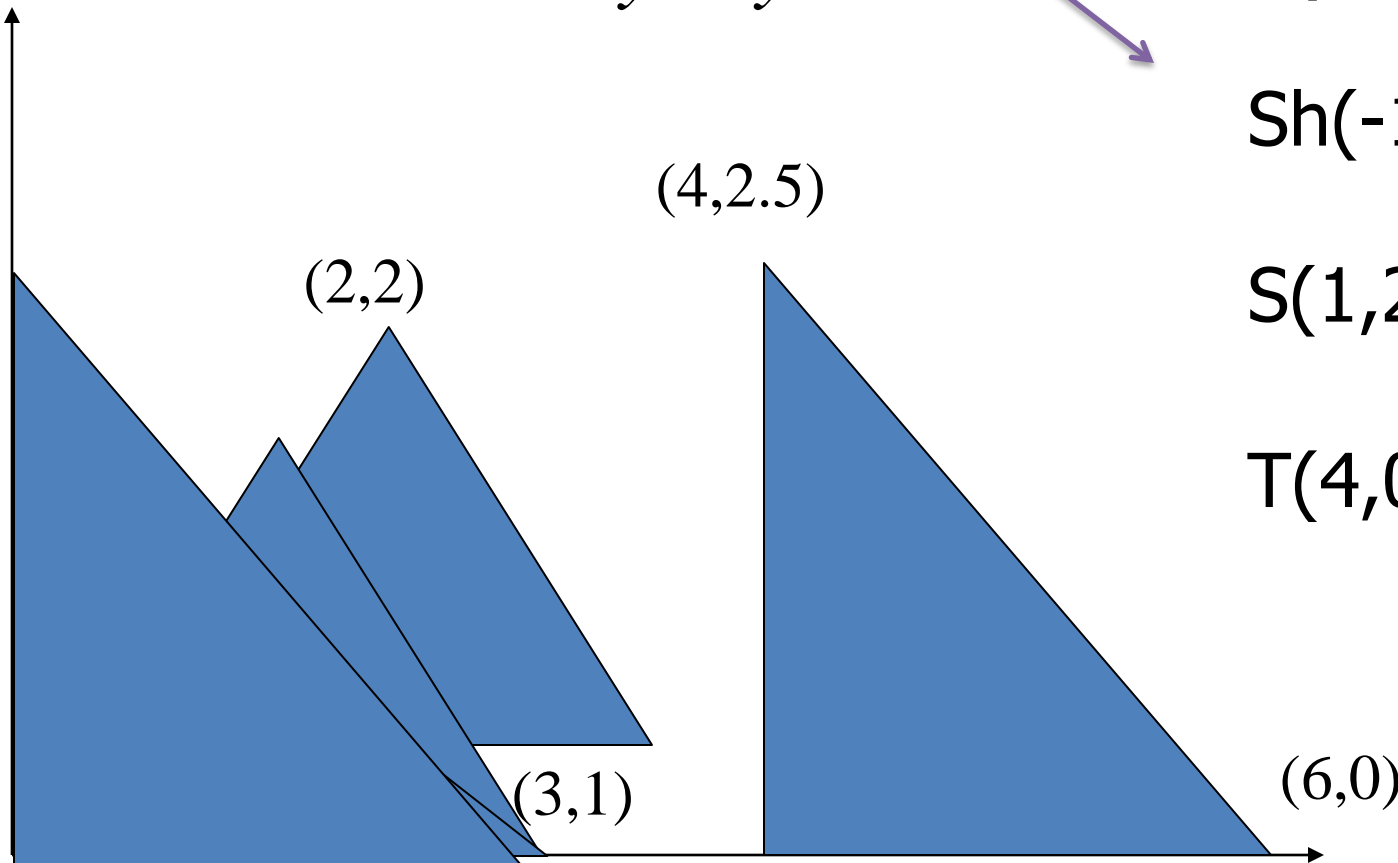
T(-1,-1)

Sh(-1, 0)

(4,2.5)

S(1,2.5)

T(4,0)



Решение задачи

1. $T(-1,-1)$

2. $Sh(-1, 0)$

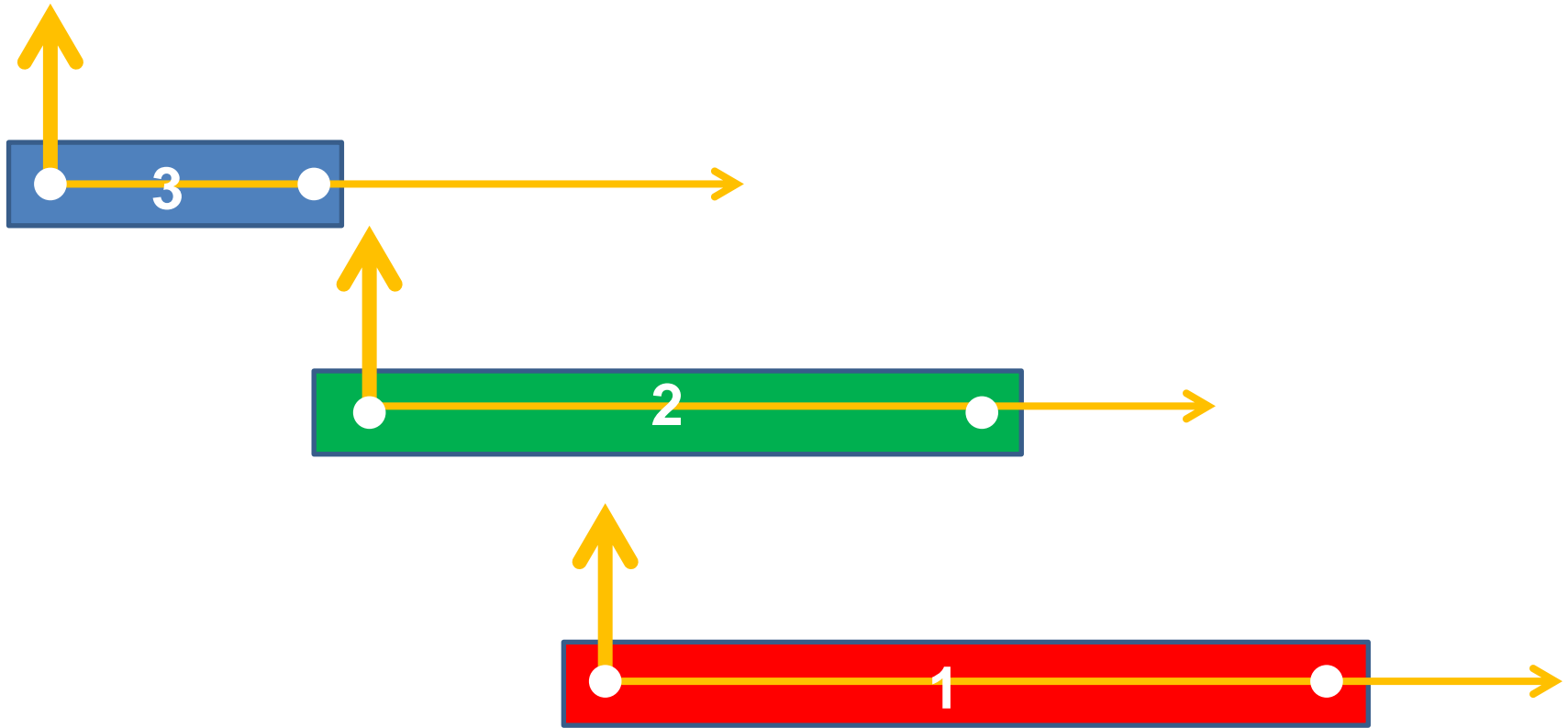
3. $S(1,2.5)$

4. $T(4,0)$

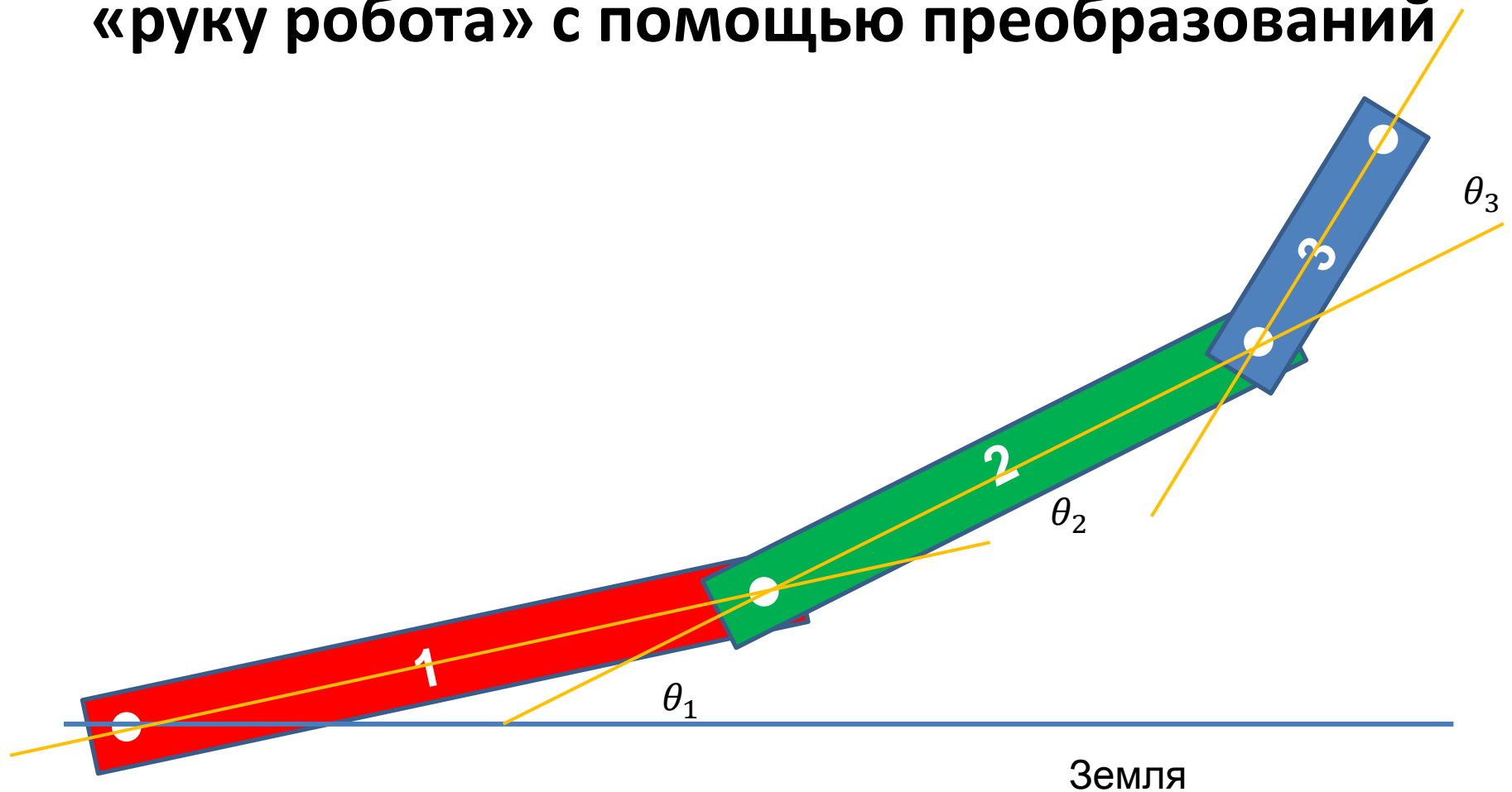
$$M = T(4,0) * S(1,2.5) * Sh(-1, 0) * T(-1,-1)$$

$$P' = M * P$$

Иерархия преобразований: даны три блока

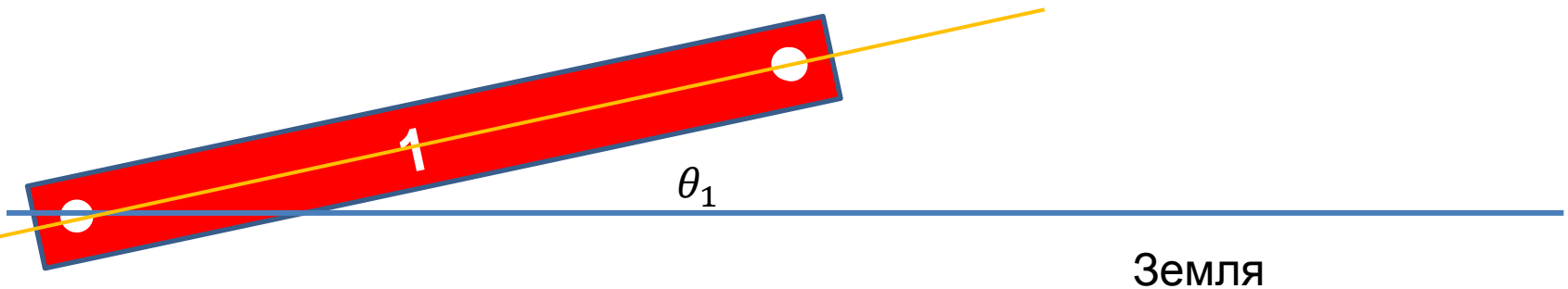


Иерархия преобразований: цель – составить «руку робота» с помощью преобразований



Шаг 1: двигаем и поворачиваем блок 1

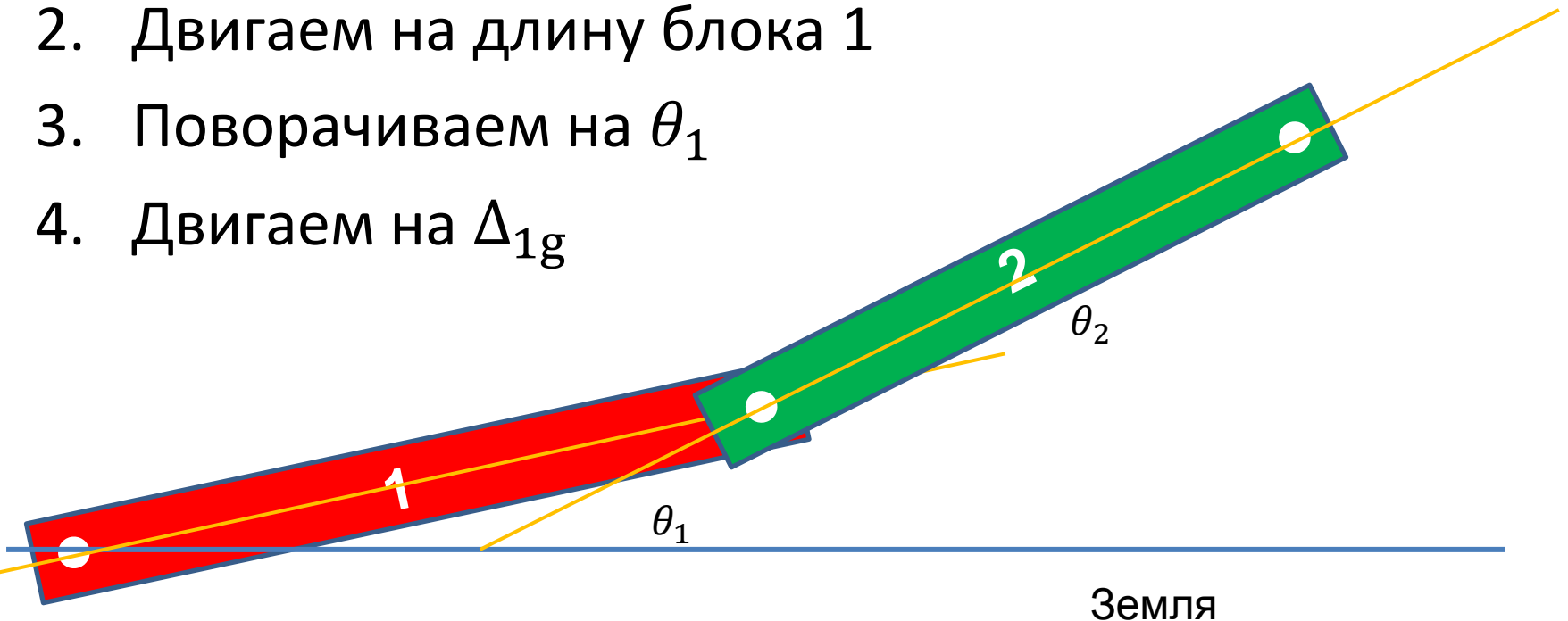
1. Поворачиваем на θ_1
2. Двигаем на Δ_{1g}



Получаем $M_{1g} = T_{1g} * R_{\theta_1}$

Шаг 2: двигаем и поворачиваем блок 2

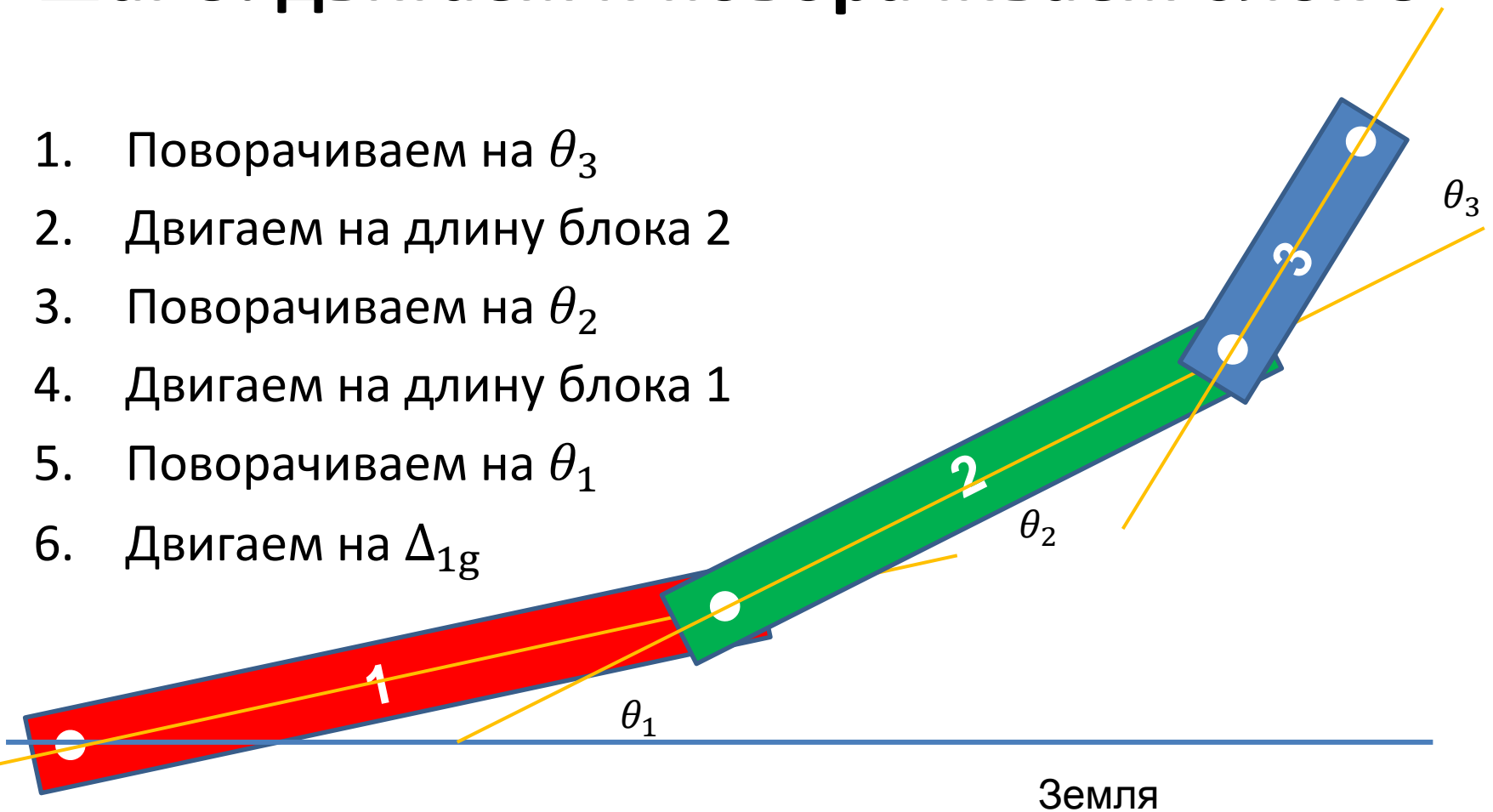
1. Поворачиваем на θ_2
2. Двигаем на длину блока 1
3. Поворачиваем на θ_1
4. Двигаем на Δ_{1g}



$$\begin{aligned} \text{Получаем } M_{2g} &= T_{1g} * R_{\theta_1} * T_{21} * R_{\theta_2} = \\ &= M_{1g} * T_{21} * R_{\theta_2} = M_{1g} * M_{21} \end{aligned}$$

Шаг 3: двигаем и поворачиваем блок 3

1. Поворачиваем на θ_3
2. Двигаем на длину блока 2
3. Поворачиваем на θ_2
4. Двигаем на длину блока 1
5. Поворачиваем на θ_1
6. Двигаем на Δ_{1g}



$$\begin{aligned} \text{Получаем } M_{3g} &= T_{1g} * R_{\theta_1} * T_{21} * R_{\theta_2} * T_{32} * R_{\theta_3} = \\ &= M_{1g} * M_{21} * T_{32} * R_{\theta_3} = M_{1g} * M_{21} * M_{32} \end{aligned}$$

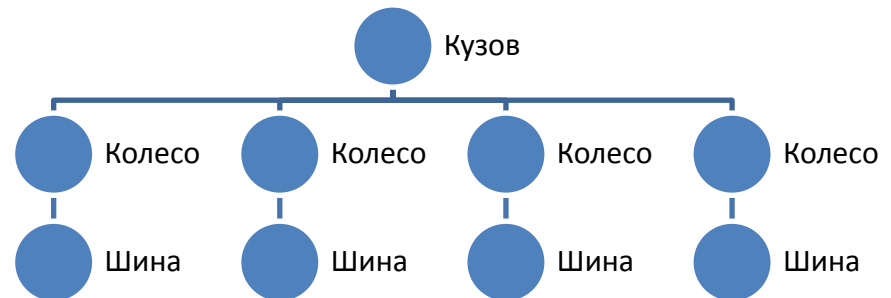
Иерархия преобразований: итог

- $M_{1g} = T_{1g} * R_{\theta_1}$
- $M_{2g} = M_{1g} * M_{21}$
- $M_{3g} = M_{2g} * M_{32}$

- Относительное преобразование каждого блока зависит только от его геометрии
- Абсолютное преобразование формируется домножением на «родительское преобразование»
- Чтобы двигать три блока вместе, надо менять только параметры первого (родительского) блока
- Чтобы повернуть 2й или 3й блок, нужно менять только параметры локального преобразования

Сложные модели создаются с помощью иерархии преобразований

Сложные геометрические сцены создаются путем иерархии моделей со своими преобразованиями



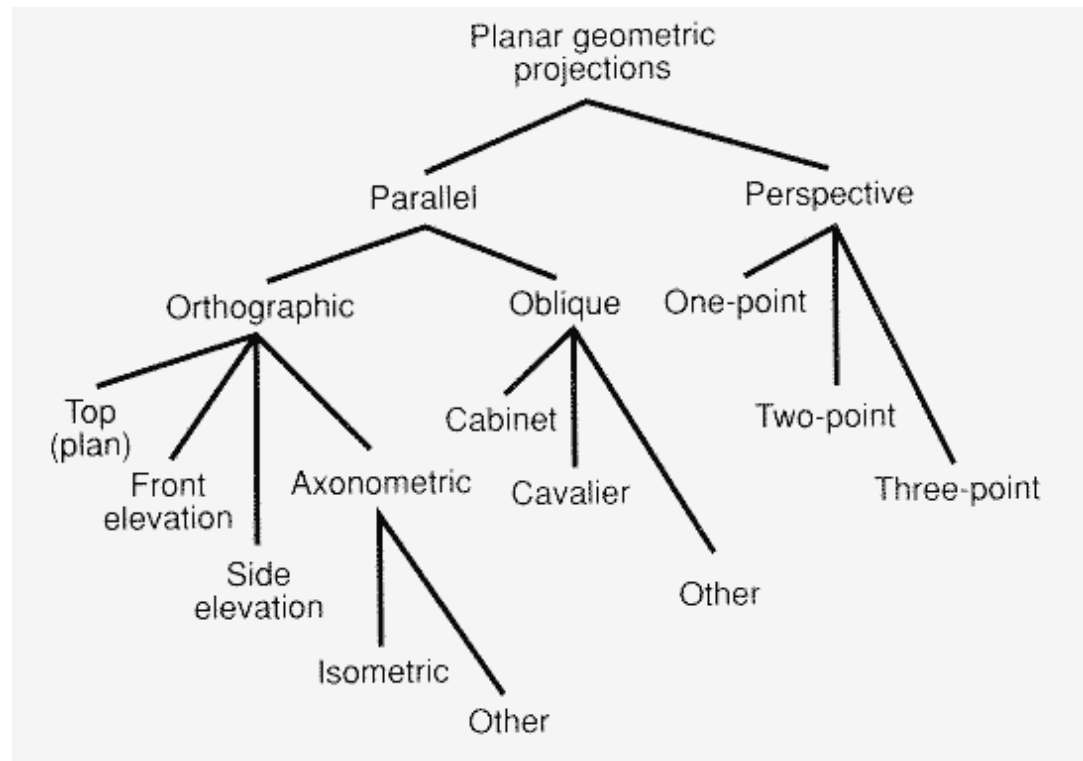
(c) wikimedia

Проективные преобразования – специальный класс преобразований для проекции в 2D

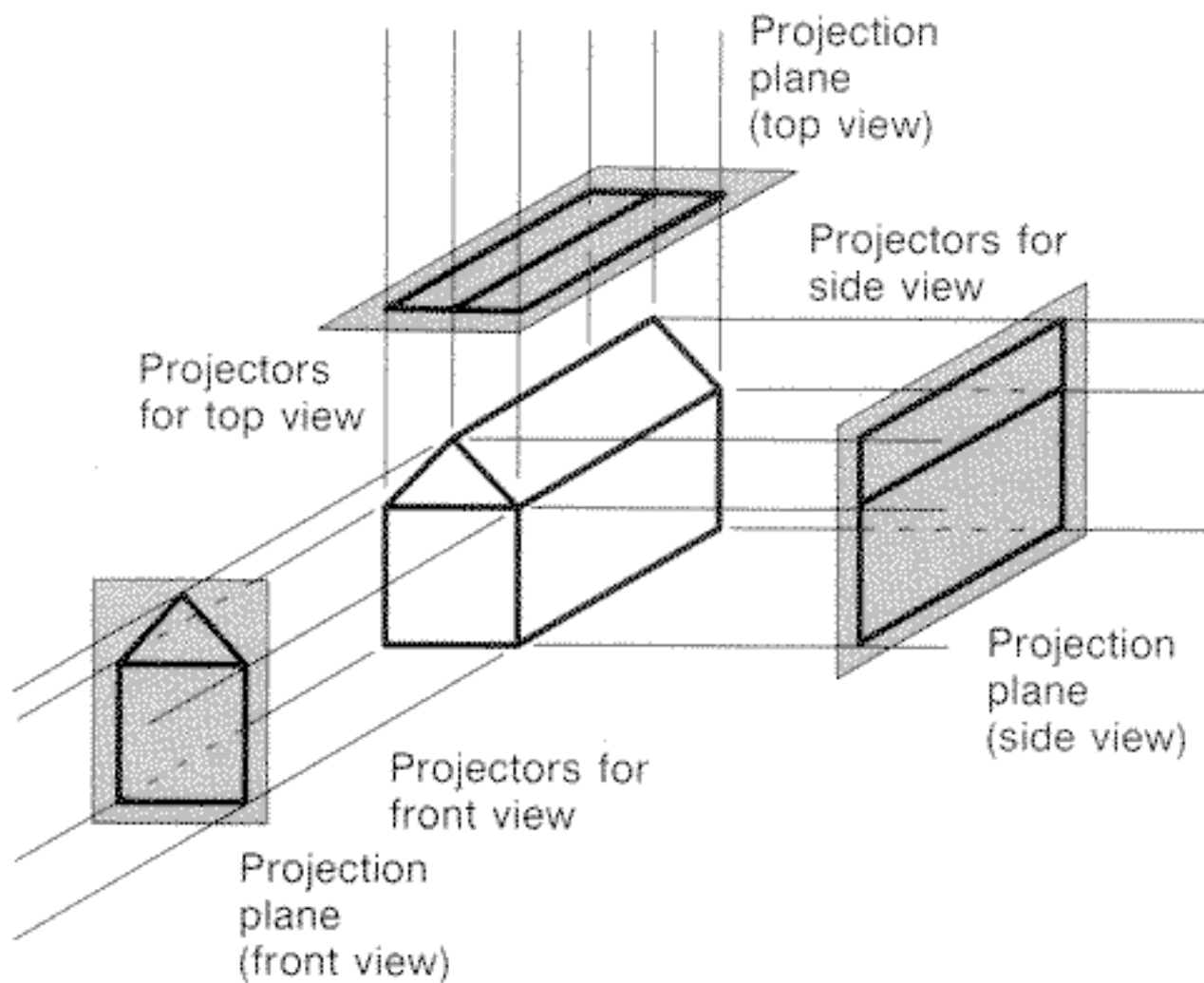
- Все современные дисплеи визуализируют изображение => необходимо преобразовать 3D данные в 2D !
- Важнейший класс преобразований
- Для выполнения таких преобразований применяются проективные преобразования
- Описываются матрицей 4x4 (линейным преобразованием)

Типы проекций

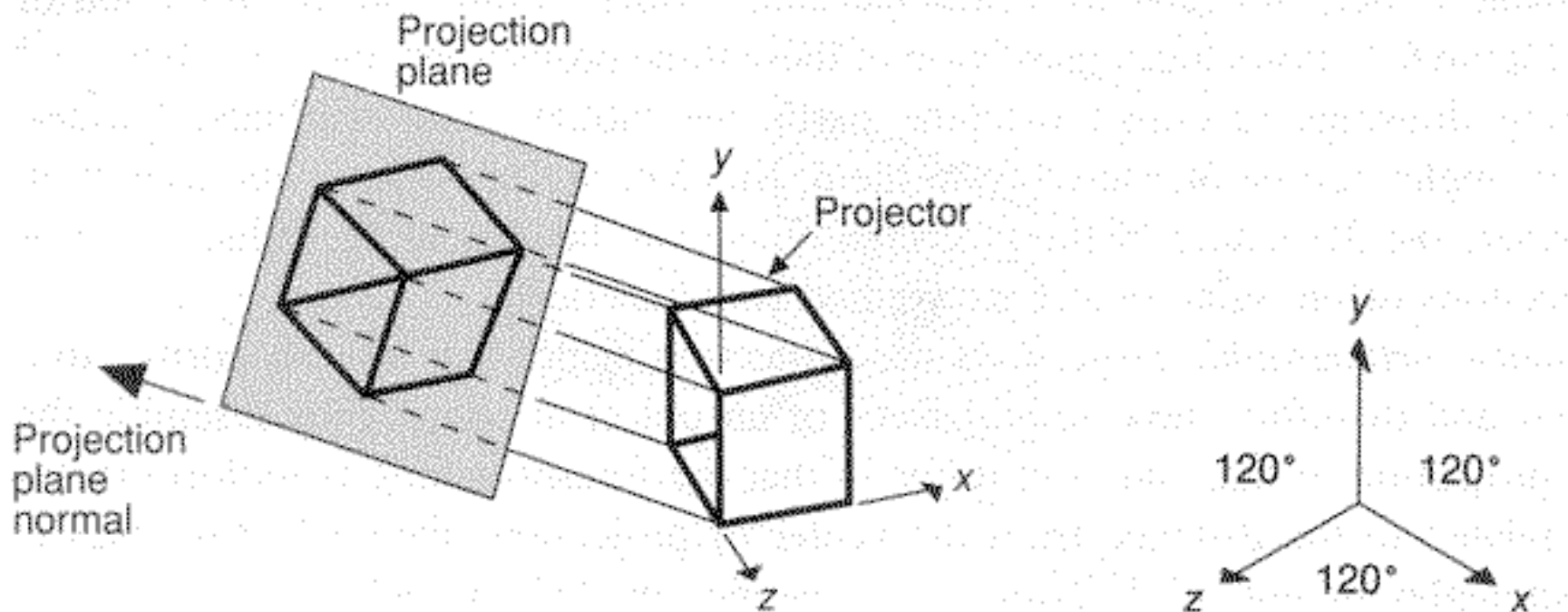
- Много разновидностей
 - Применяются в дизайне и т.п.
- Основные виды
 - Параллельные
 - Ортографические
 - Косоугольные
 - Перспективные
 - 1,2,3-х точечные



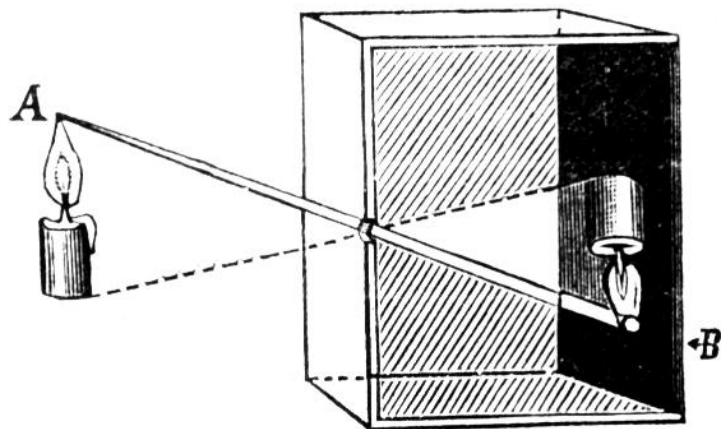
Ортографическая проекция – вдоль осей



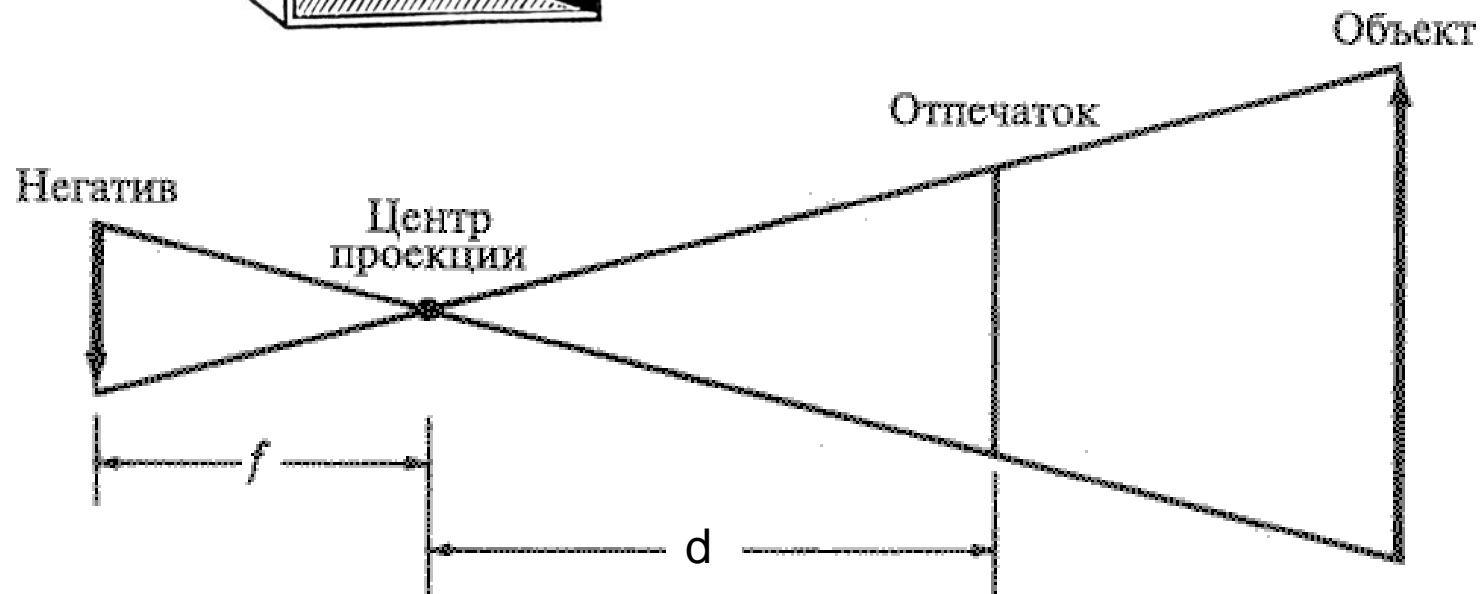
Изометрическая проекция – размеры сохраняются



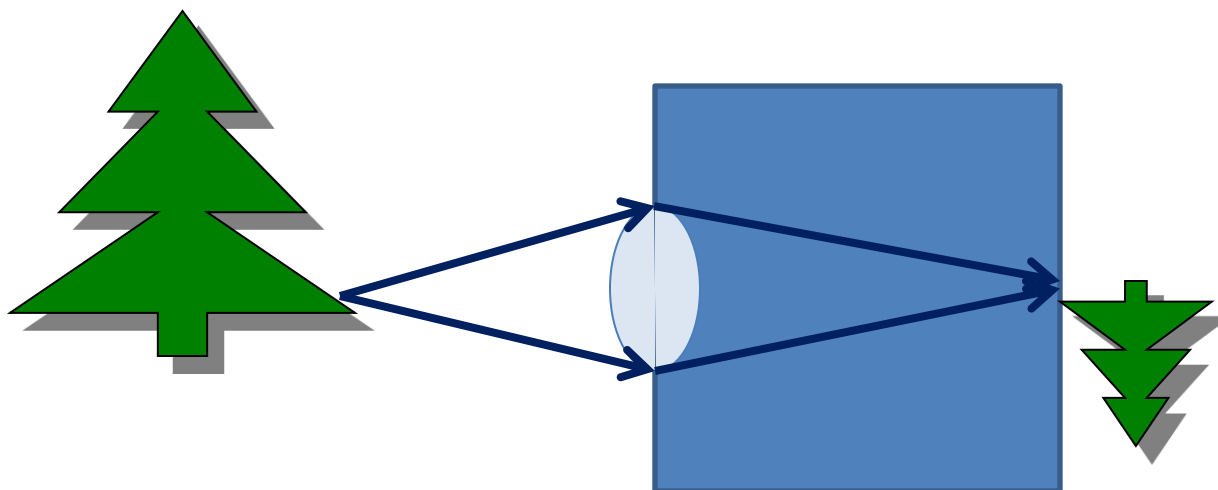
Перспективная проекция пришла из фотографии



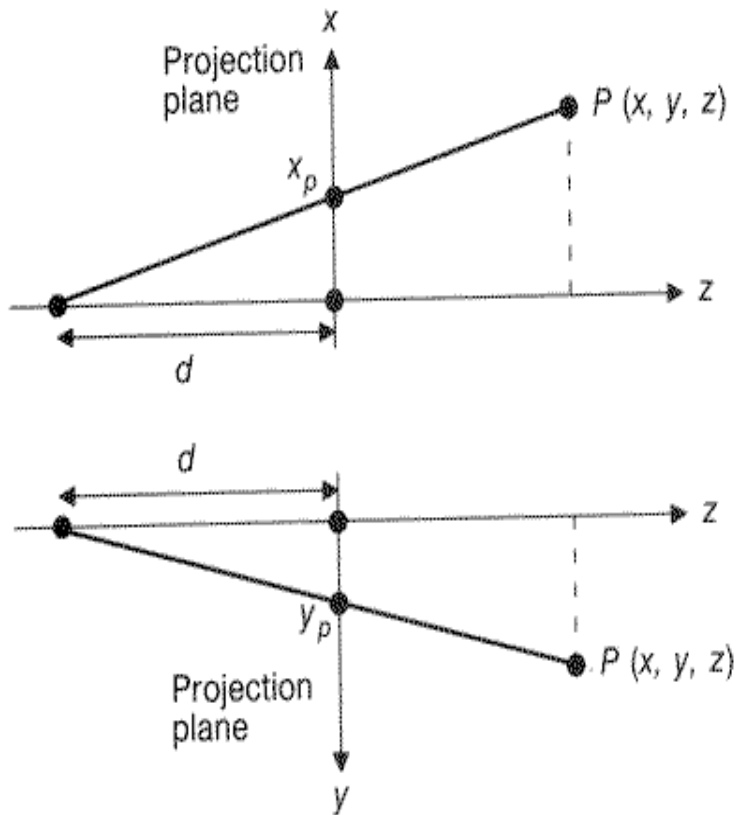
Модель объектива (камера-обскура) с бесконечно малым размером диафрагмы



Оптические системы с линзой



Математическая запись перспективной проекции на плоскость Oxy вдоль оси z



$$\frac{x_p}{d} = \frac{x}{z+d}, \quad \frac{y_p}{d} = \frac{y}{z+d},$$

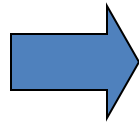
$$x_p = \frac{d \cdot x}{z+d} = \frac{x}{\left(\frac{z}{d}\right) + 1}$$

$$y_p = \frac{d \cdot y}{z+d} = \frac{y}{\left(\frac{z}{d}\right) + 1}$$

Перспективная проекция : возможна запись в матричном виде

$$x_p = \frac{x}{(z/d) + 1}$$

$$y_p = \frac{y}{(z/d) + 1}$$



$$M_{per} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/d & 1 \end{bmatrix}$$

Запись в матричном виде: Перспективное деление

Применяем матрицу M_{per}

$$M_{per} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \\ z/d + 1 \end{pmatrix}$$

Необходима нормализация
(перспективное деление)

Четвертая компонента не равна 1 !

– Результат уже не в декартовых
координатах

Однородные координаты!

$$x = x / w$$

$$y = y / w$$

$$z = z / w$$

В конвейере OpenGL применяются исключительно линейные и проективные преобразования

- В графическом конвейере OpenGL используются линейные и проективные геометрические преобразования
- Преобразования описываются матрицами 4×4
- Операции производятся над векторами в однородных координатах

Лекция из трех частей: алгоритм растеризации, OpenGL, геометрические преобразования

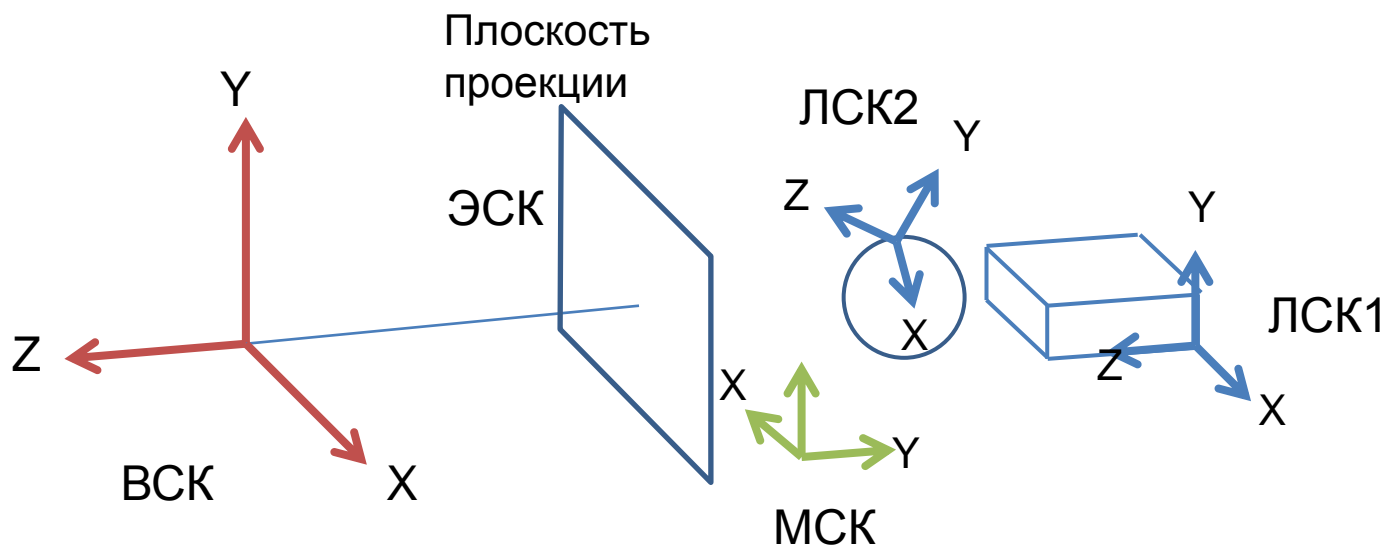
Алгоритм синтеза изображений с помощью растеризации

OpenGL: Архитектура и основные функции

Геометрические преобразования

Геометрические преобразования в OpenGL

Обработка вершин: три последовательных преобразования (ЛСК->МСК->ВСК->ЭКС)

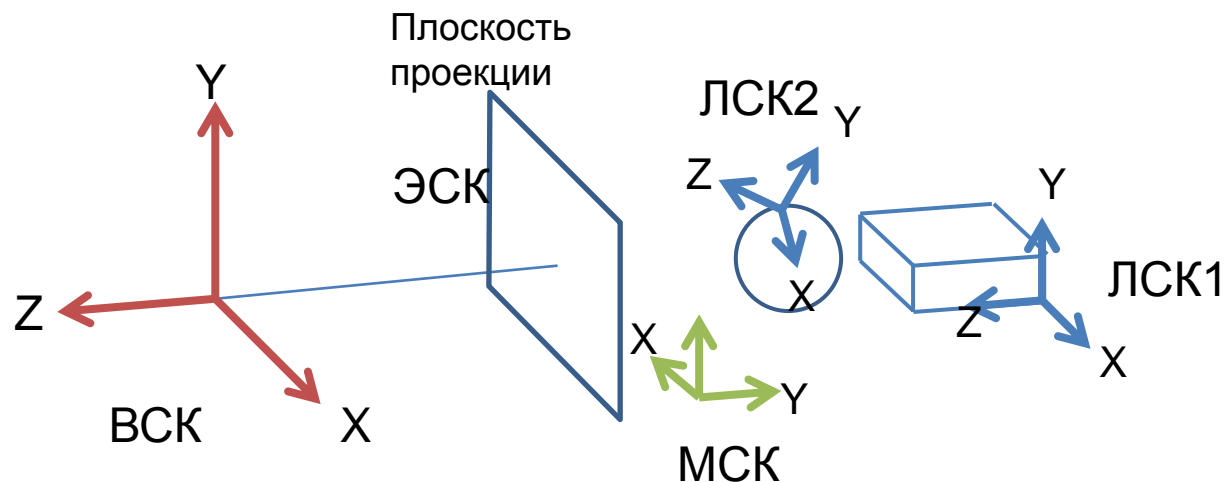


Модельное преобразование – из локальных в мировые координаты

Переводит модель, заданную в локальных (собственных) координатах, в глобальное (мировое пространство)

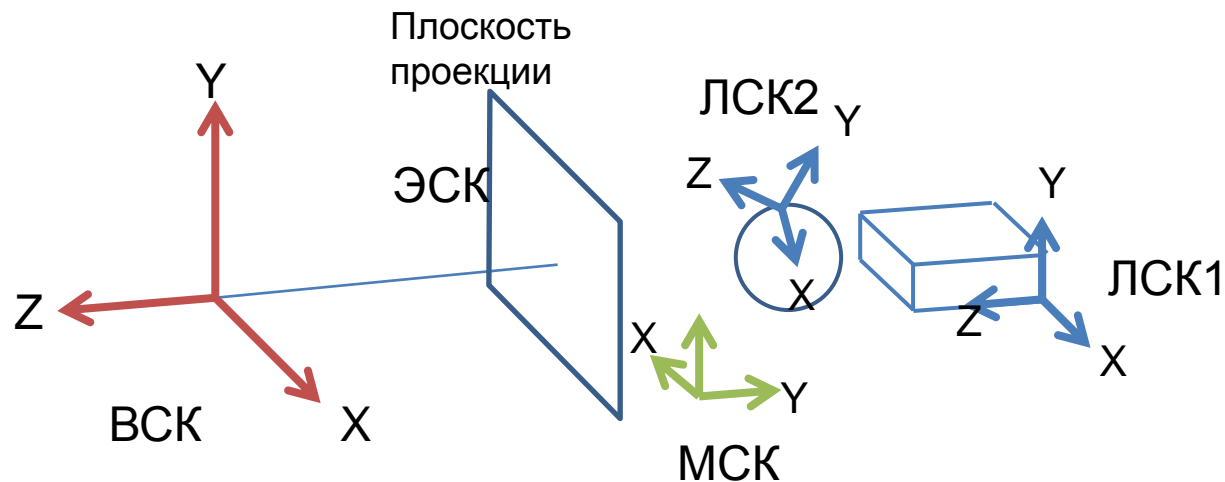
Модель «собирается» из частей, с помощью модельных преобразований (обычно композиция переносов, поворотов, масштабирования)

На выходе – модель в единых мировых координатах



Виртуальная камера – нужно задать для получения изображения

- Определяет положение наблюдателя в пространстве
- Параметры
 - Положение
 - Направление взгляда
 - Направление «вверх»
 - Параметры проекции
- Положение, направление взгляда и направление «вверх» задаются матрицей видового преобразования



Видовое преобразование – нужно для перемещения мира, который видит камера

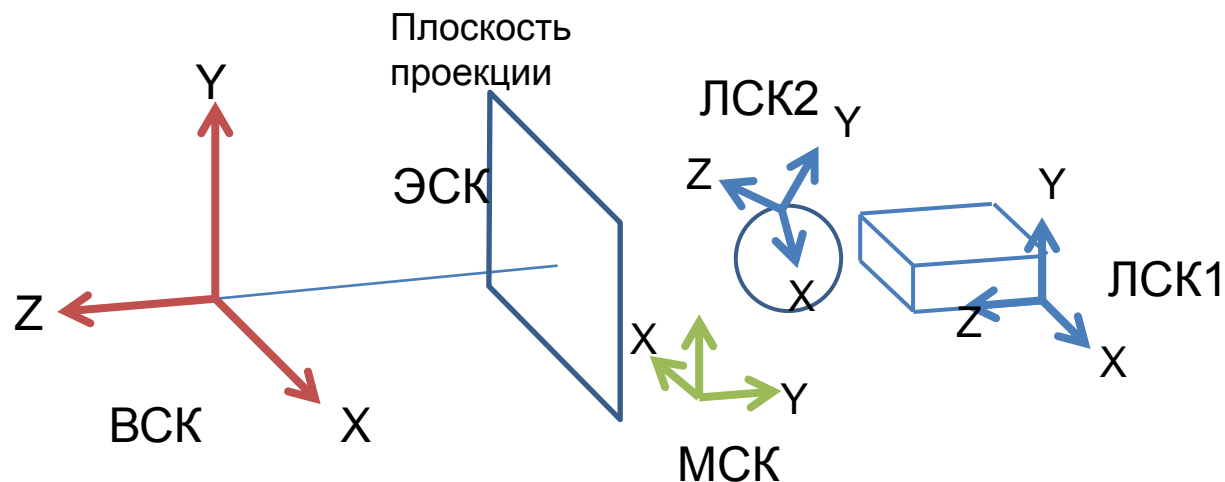
- Проективные преобразования описывают «стандартные» проекции, т.е. проецируют фиксированную часть пространства
- Что если мы хотим переместить наблюдателя?

Варианты:

- Изменить матрицу проекции чтобы включить в нее информации о камере
 - **Применить дополнительное преобразование, «подгоняющее» объекты под стандартную камеру**
- Стандартная камера в OpenGL:
 - Наблюдатель в $(0, 0, 0)$
 - Смотрит по направлению $(0, 0, -1)$
 - Верх $(0, 1, 0)$

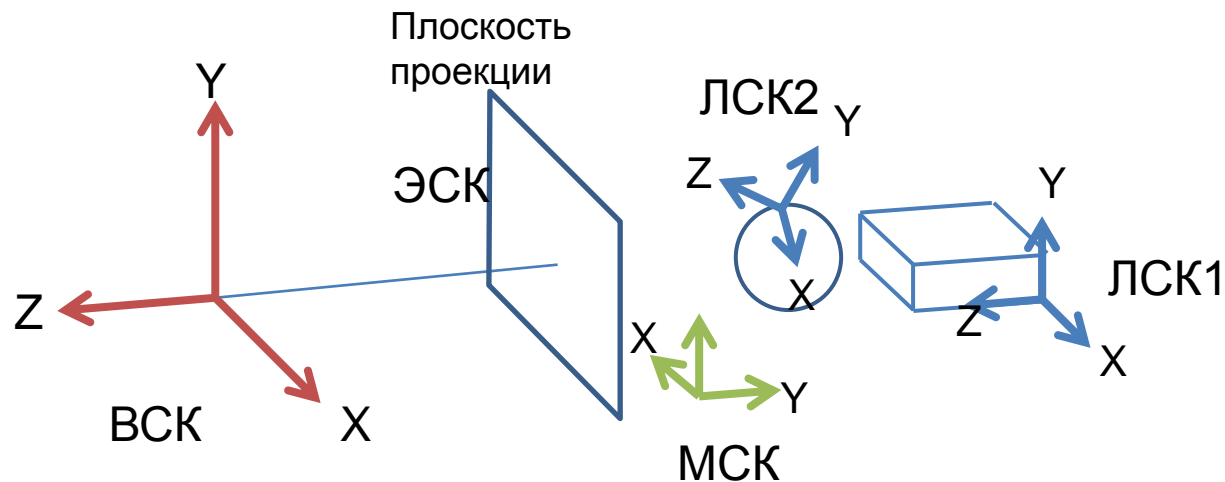
Видовое преобразование – из мировых в видовые координаты

- «Подгоняет» мир под стандартную камеру, преобразует мировую систему координат в видовые координаты (которые подходят для «стандартной» камеры)
- На выходе – модель, готовая к проекции на экран



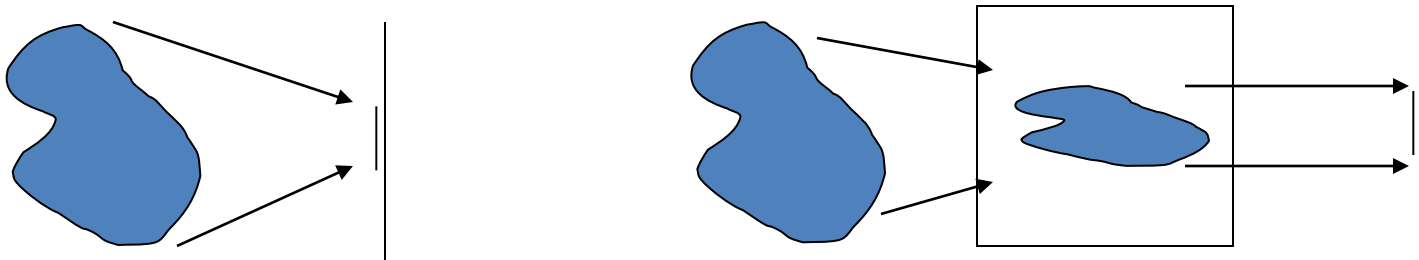
Проективное преобразование – перспективные и масштабные искажения

- Выполняет 3D преобразование, подготавливая модель к переходу на 2D



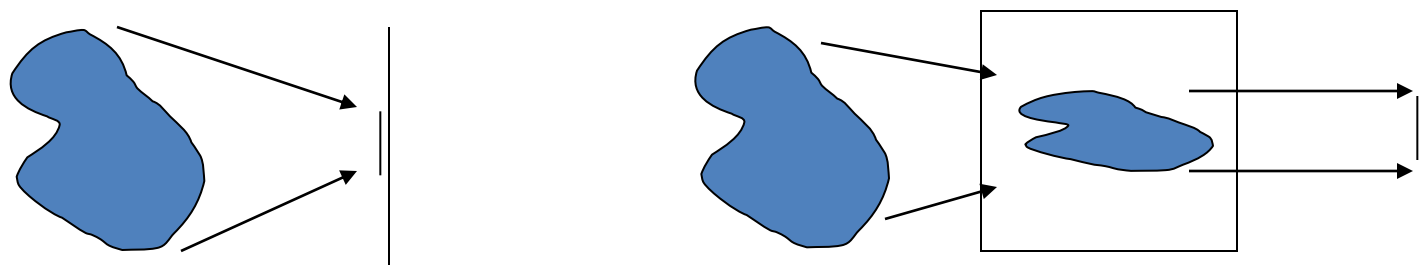
Проективное преобразование vs. проекция (1/2)

- Матрица проекции вырожденная
 - Фактически, информация от координате z теряется
- Часто необходимо выполнять дополнительные действия уже ПОСЛЕ проецирования
 - Например, удаление невидимых линий/поверхностей
- Поэтому часто (e.g. в OpenGL) используется проективное преобразование вместо проекции
 - Проективное преобразование невырожденно и позволяет анализировать глубину!

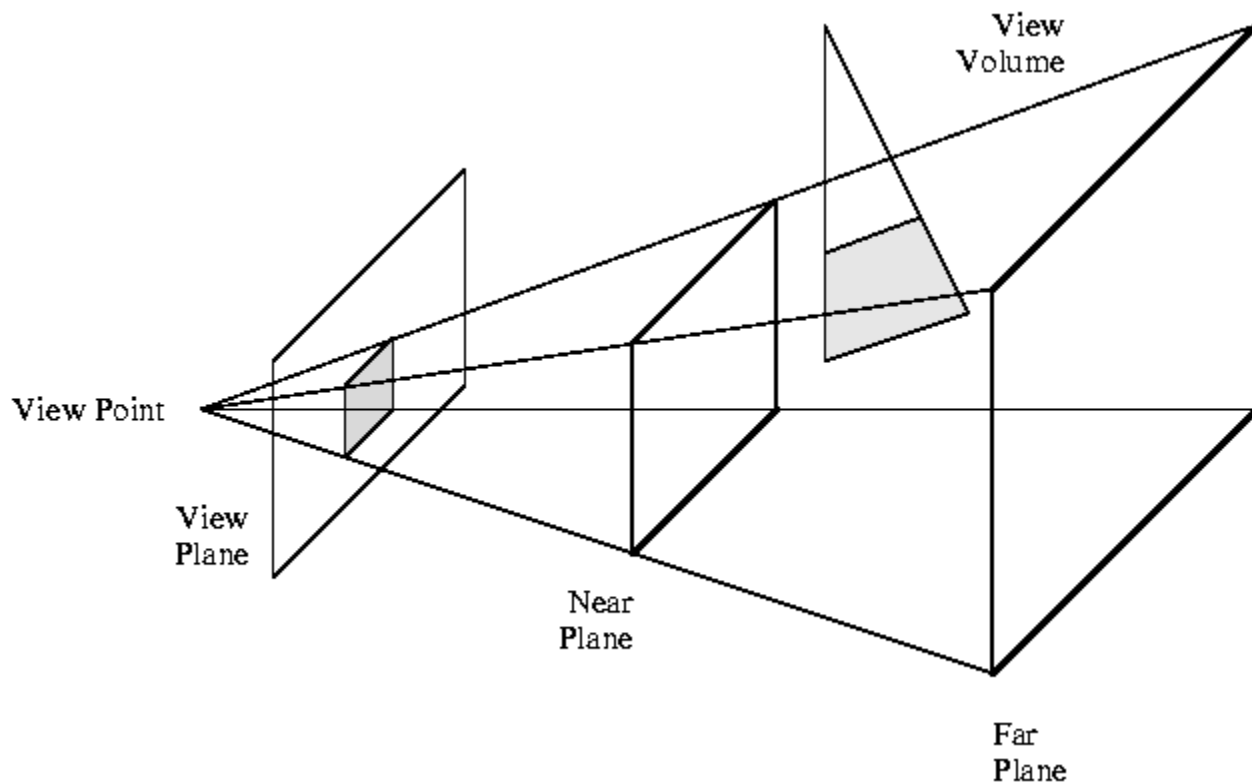


Проективное преобразование vs. проекция (2/2)

- Проективное преобразование переводит модель в еще одну систему координат – **пространство отсечения (clip space)**
- В пространстве отсечения видимая область превращается в куб (**каноническую пирамиду видимости**) $[-1,-1,-1] - [1,1,1]$

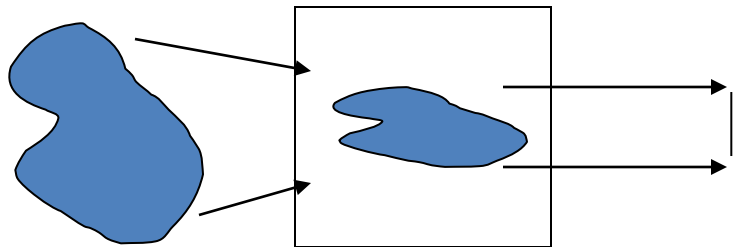


При задании проективного преобразования необходимо указать границы отсечения



Преобразование в экранные координаты – простое отбрасывания z-координаты

1. Отбрасываем координату z
2. Умножаем на высоту/ширину окна
– Получаем экранные координаты



Модельно-видовое преобразование = модельное + видовое

- OpenGL не имеет отдельных матриц для видового и модельного преобразования
- Поэтому нужно задавать сразу произведение:

$$M = M_{view} \cdot M_{mdl}$$

Матрицы преобразований

- ❑ Выбираем матрицу преобразований для изменения:

```
void glMatrixMode (GLenum mode) ;  
    mode={GL_MODELVIEW|GL_PROJECTION}
```

- ❑ Две основные операции над матрицами:

```
void glLoadIdentity () ;
```

$$M = E$$

```
void glMultMatrixd (GLdouble c[16]) ;
```

$$M = M \cdot \begin{bmatrix} c[0] & c[4] & c[8] & c[12] \\ c[1] & c[5] & c[9] & c[13] \\ c[2] & c[6] & c[10] & c[14] \\ c[3] & c[7] & c[11] & c[15] \end{bmatrix}$$

Матрицы преобразований (2)

```
void glTranslated(GLdouble x,  
                 GLdouble y,  
                 GLdouble z);
```

```
void glScaled(GLdouble x,  
             GLdouble y,  
             GLdouble z);
```

```
void glRotated(GLdouble angle,  
              GLdouble ax,  
              GLdouble ay,  
              GLdouble az);
```

```
void gluPerspective(GLdouble fov,  
                  GLdouble aspect,  
                  GLdouble znear,  
                  GLdouble zfar);
```

Видовое преобразование

- Настройка виртуальной камеры

```
gluLookAt( eyex, eyey, eyez,  
           aimx, aimy, aimz,  
           upx, upy, upz)
```

- eye – координаты наблюдателя
- aim – координаты “цели”
- up – направление вверх

Модельно-видовое преобразование (2)

- `glMatrixMode(GL_MODELVIEW);`
 - `gluLookAt(..);`
 - `glTranslate(...);`
 - `glRotate(...);`
 - `glTranslate(...);`
 - `glBegin(...);`
 - ...
 - `glEnd();`
-
- Виртуальная камера
- Модельное преобразование
- Геометрия

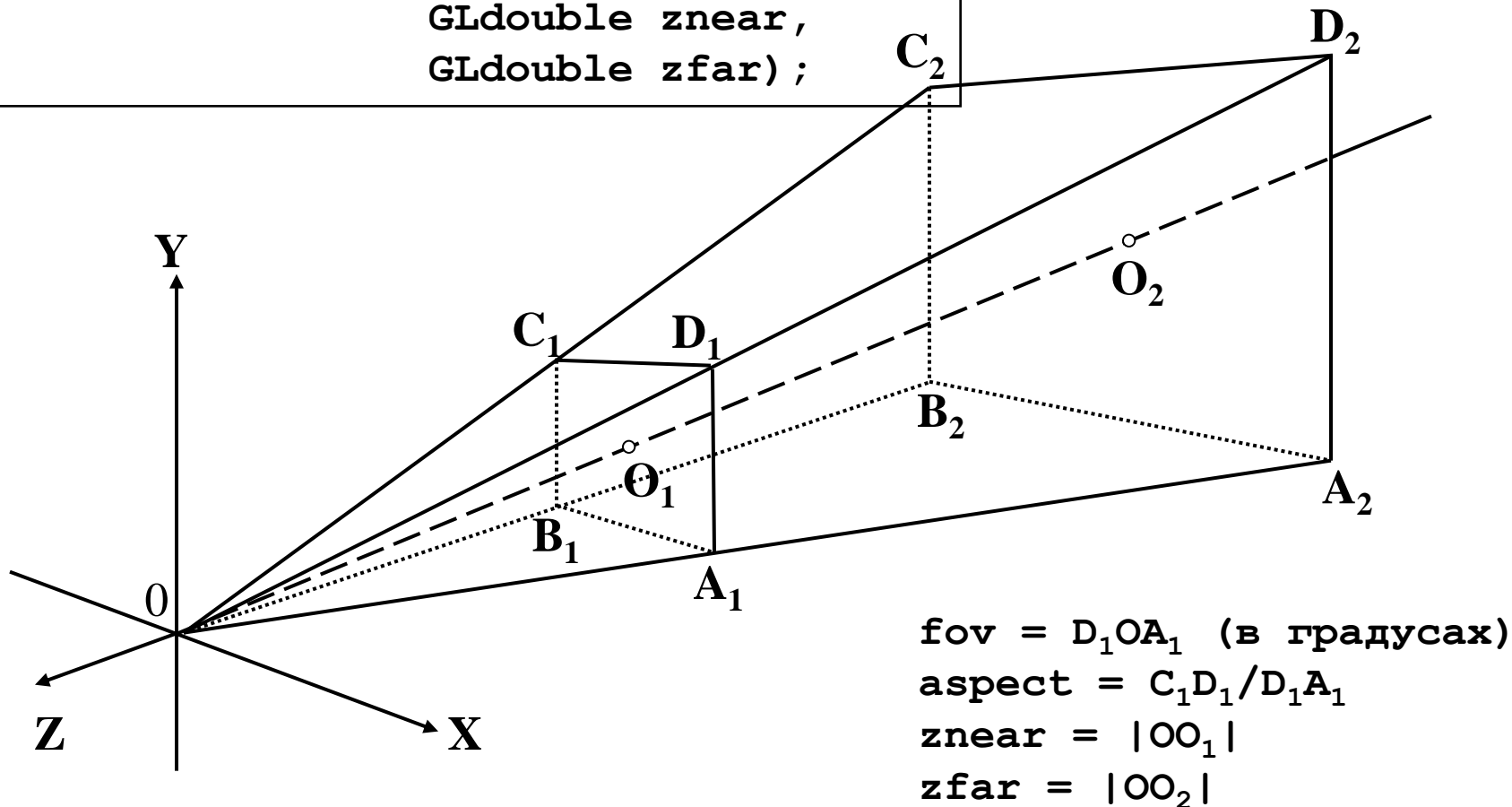
Внимание! При определении геометрии к ней применяется текущий набор матриц преобразования!

Проективное преобразование

- `glMatrixModel(GL_PROJECTION);`
- `gluPerspective(...)`

Как работает gluPerspective

```
void gluPerspective(GLdouble fov,  
                  GLdouble aspect,  
                  GLdouble znear,  
                  GLdouble zfar);
```



Итоги 1/2

- Растеризация – метод синтеза изображений с помощью отображения трехмерной геометрии на экран
- OpenGL
 - Кросс-платформенная библиотека функций для создания интерактивных 2D и 3D приложений
 - Определение геометрии
 - glVertex, glBegin, glEnd

Итоги 2/2

- Геометрические преобразования
 - Типы преобразований
 - Нелинейные преобразования
 - Линейные преобразования (проективные)
 - Аффинные преобразования
 - Преобразования подобия
 - Изометрические преобразования
 - Однородные координаты
 - Много применений: унификация операций с матрицами, перспективное деление и т.п.
 - Комбинация, иерархия преобразований
 - Сборка модели из локальных компонент
- Графический конвейер: от локальной модели до точки на экране
 - Локальные, мировые, экранные координаты