



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



国家超级计算广州中心
NATIONAL SUPERCOMPUTER CENTER IN GUANGZHOU

计算机图形学

OpenGL 编程介绍

陶钧

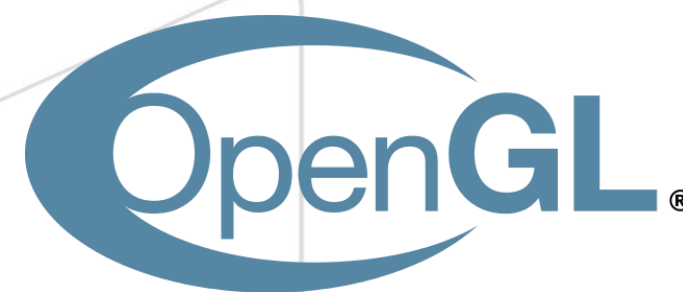
taoj23@mail.sysu.edu.cn

中山大学 计算机学院
国家超级计算广州中心

- OpenGL是什么？
- OpenGL如何工作？
- OpenGL程序结构简介

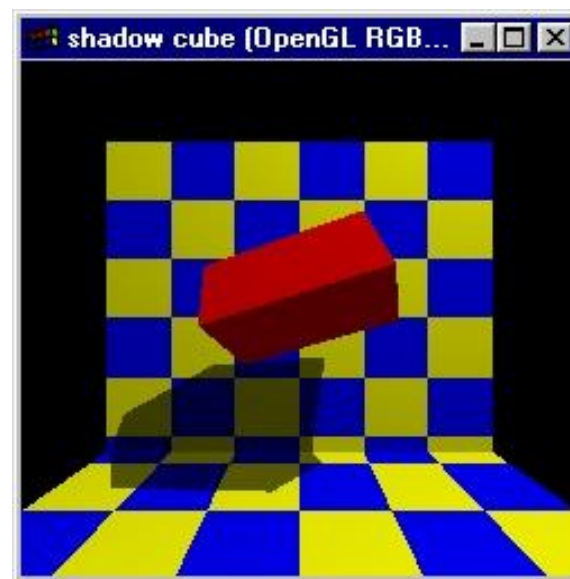
• Open Graphics Library (OpenGL)

- 用于渲染2D、3D矢量图形的跨语言、跨平台应用程序接口（API）
 - OpenGL的高效实现由显示装置产商提供，非常依赖于具体的硬件
 - 但API的内容不依赖于硬件或产商
- 1992年，由Silicon Graphics（SGI）领导成立由若干公司组成的OpenGL架构审查委员会（Architecture Review Board，ARB）
 - 源自当时图形工作站的领头羊SGI的IRIS GL API
 - OpenGL ARB负责OpenGL规范的维护和扩充
- 2006年，OpenGL ARB投票决定将控制权转移至Khronos Group
 - OpenGL API依然在不断进化中



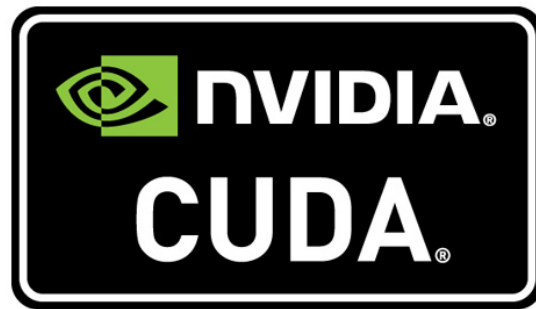
Open Graphics Library (OpenGL)

- OpenGL是用于渲染的API
- 应用程序通过调用OpenGL API控制显卡，以简单的图形位元绘制2D/3D景象，最终产生屏幕空间中的图像
- API由近350个不同的函数调用组成
- OpenGL API只提供渲染绘制功能，没有音频、窗口等相关函数



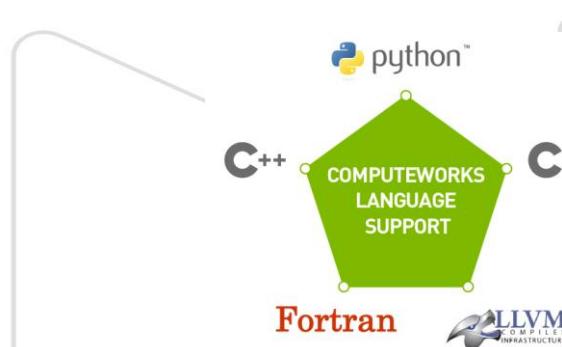
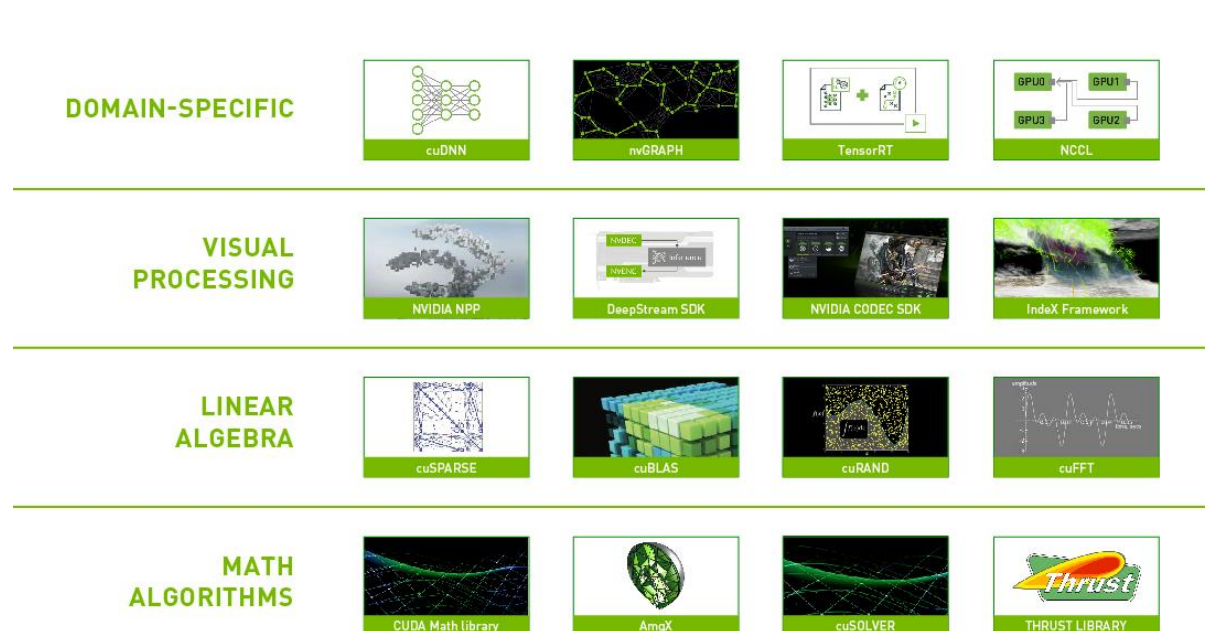
- OpenGL并非唯一的选择

- 其他选择还包括：NVIDIA CUDA, DirectX™, Windows Presentation Foundation™ (WPF), RenderMan™, HTML5+WebGL™, JAVA 3D™



OpenGL并非唯一的选择

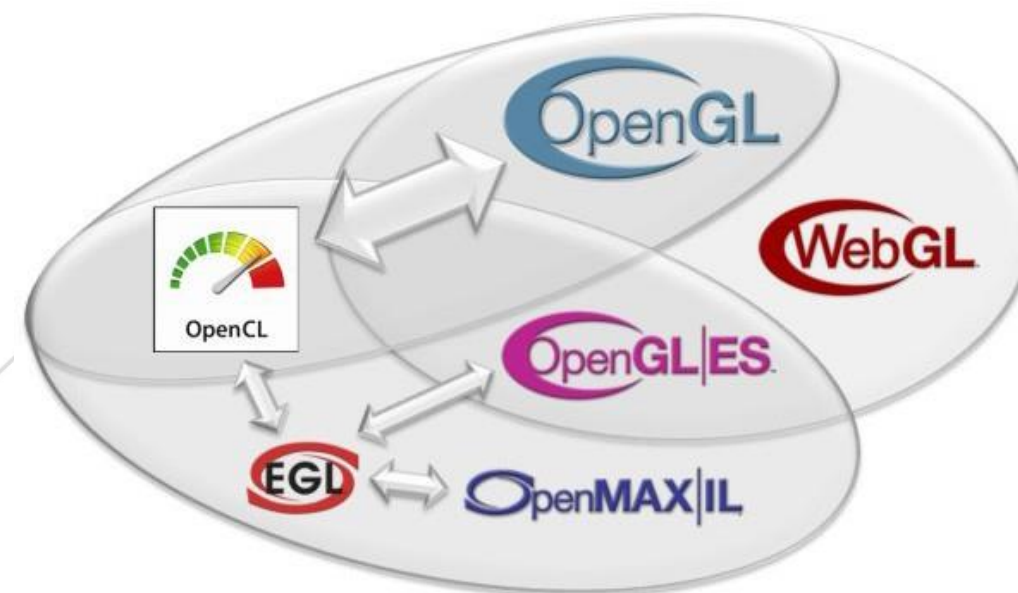
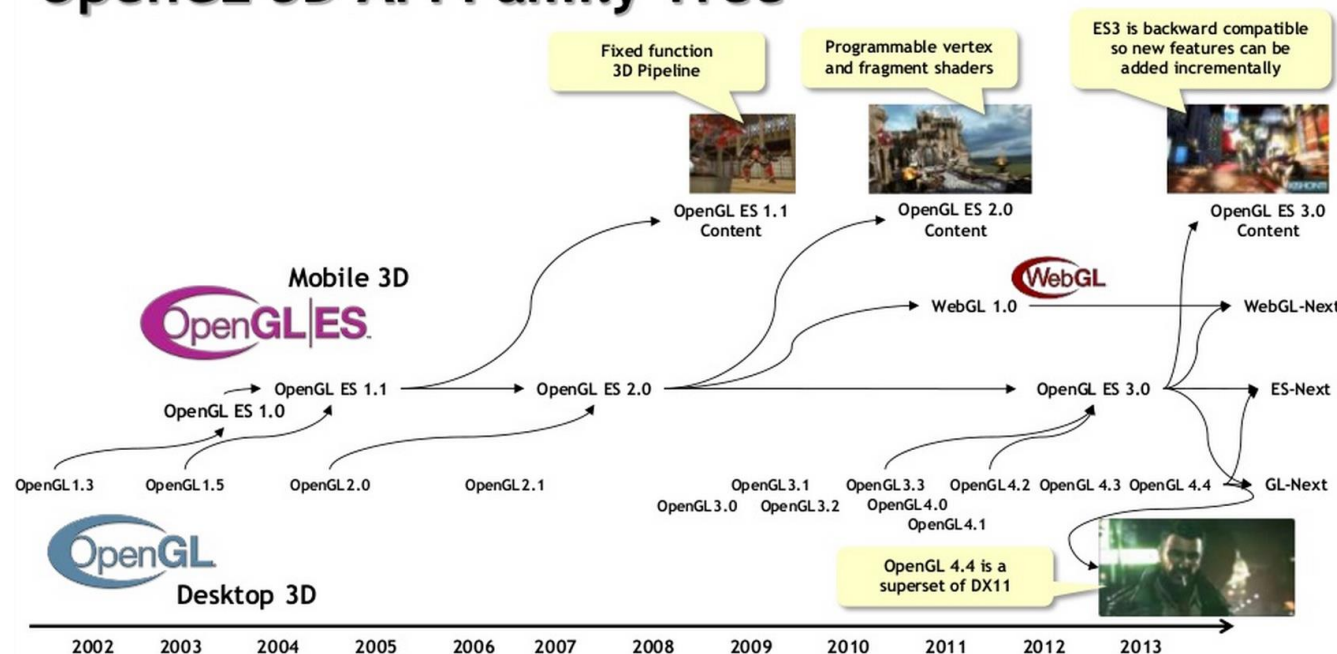
- NVIDIA CUDA Toolkit提供了使用显卡加速的高性能应用开发环境
 - 严格地说并不是一个图形库



OpenGL发展

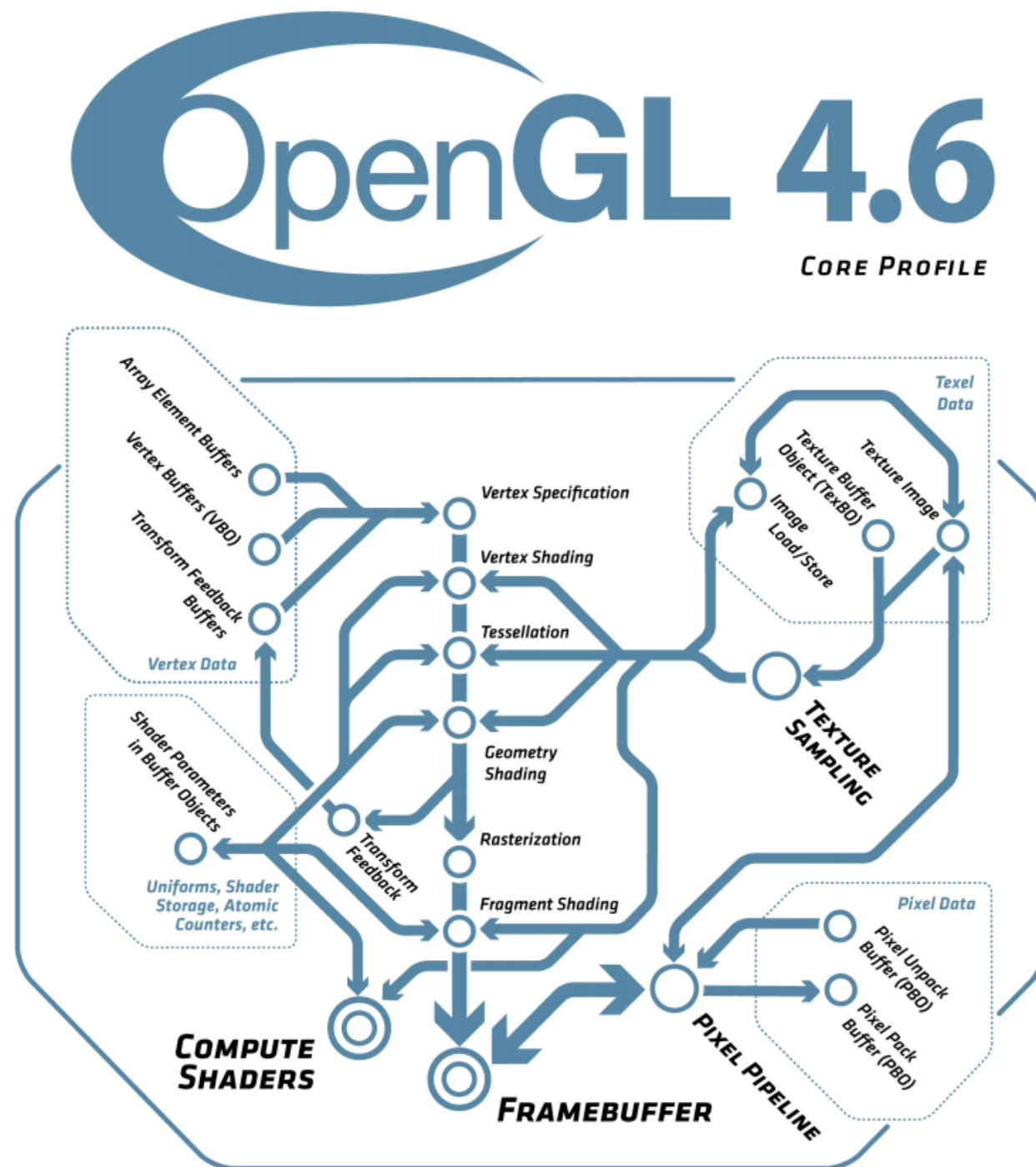
- 当前由Khronos Group发布OpenGL新版本，持续扩展原有API提供新特性
- 当前最新版本为2017年7月发布的OpenGL 4.6
- Vulkan (“Next Generation OpenGL Initiative (glNext)”)
 - 整合OpenGL与OpenGL ES，不再兼容现有OpenGL版本
 - 初代Vulkan API与2016年2月发布

OpenGL 3D API Family Tree

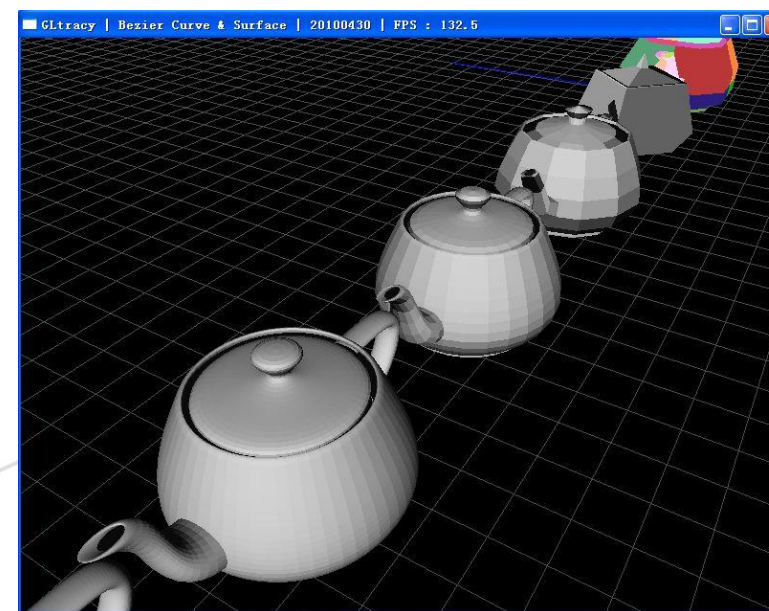


OpenGL能做什么？

- 定义物体形状、材料属性、光照
- 排列物体，根据三维空间中的摄像机进行合成
- 将物体从数学表达形式转换为 fragment
 - 光栅化, rasterization
- 计算每个fragment的颜色，混合得到最终图像上每个像素的颜色



- OpenGL不包含复杂物体的渲染函数
 - 使用基本几何形状（点、线、及多边形）构建复杂物体
- OpenGL Utility Toolkit (GLUT)
 - OpenGL实用函数工具包，非官方OpenGL的组成部分
 - 提供系统级别的输入输出
 - 窗口定义、窗口控制、监控键盘与鼠标输入、等
 - 提供一系列基本几何体绘制函数
 - 正方体、球体、Utah teapot
 - 实心（solid）及线框（wireframe）模式
 - 提供一定的菜单功能



• 安装（以windows为例）

– OpenGL官网下载

- https://www.opengl.org/resources/libraries/glut/glut_downloads.php
- “We direct you to use **FreeGLUT** found on SourceForge: <http://freeglut.sourceforge.net/>. The original GLUT has been unsupported for 20 years.”

– 安装便捷：

- 将glut.dll拷贝至{Windows DLL dir}/glut32.dll
- 将glut.lib拷贝至{VC++ lib path}/glut32.lib
- 将glut.h拷贝至{VC++ include path}/GL/glut.h
- 使用时只需 `#include <GL/glut>` 即可

– 实际使用中建议Qt

- 在课程网页中将提供Qt程序模板

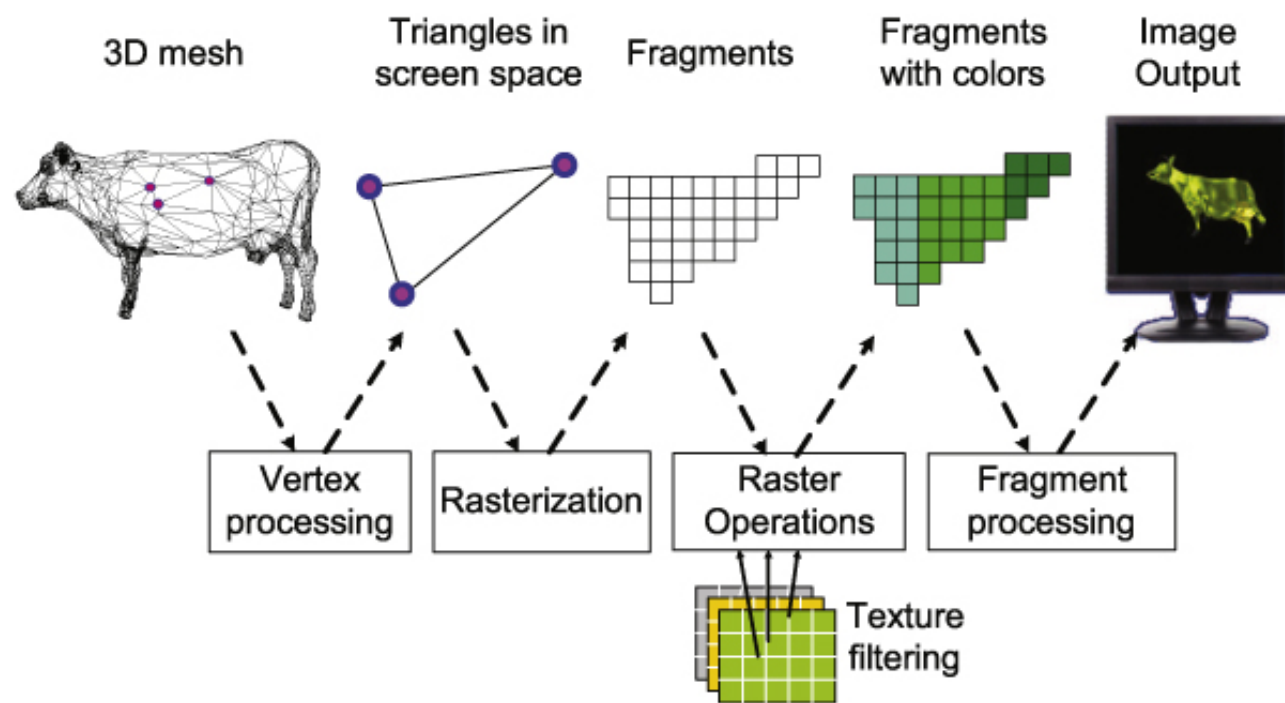


- OpenGL是什么？
- OpenGL如何工作？
- OpenGL程序结构简介

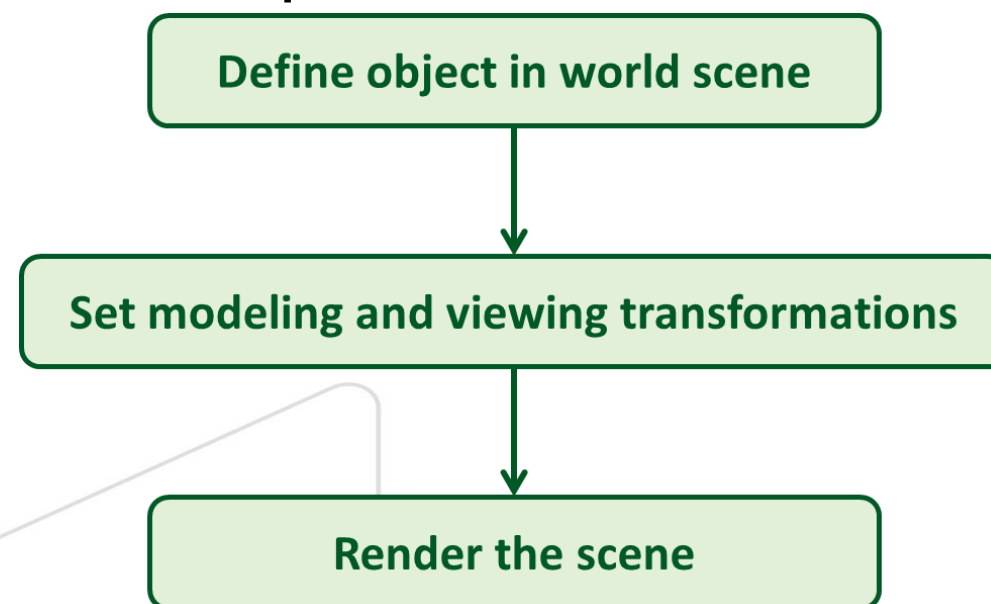
OpenGL是一个状态机

- 通过函数调用设置其内部变量的状态，或查询当前状态
- 在设置新的状态前，当前状态不会发生改变
- 每个系统状态变量都有缺省值

OpenGL简易pipeline



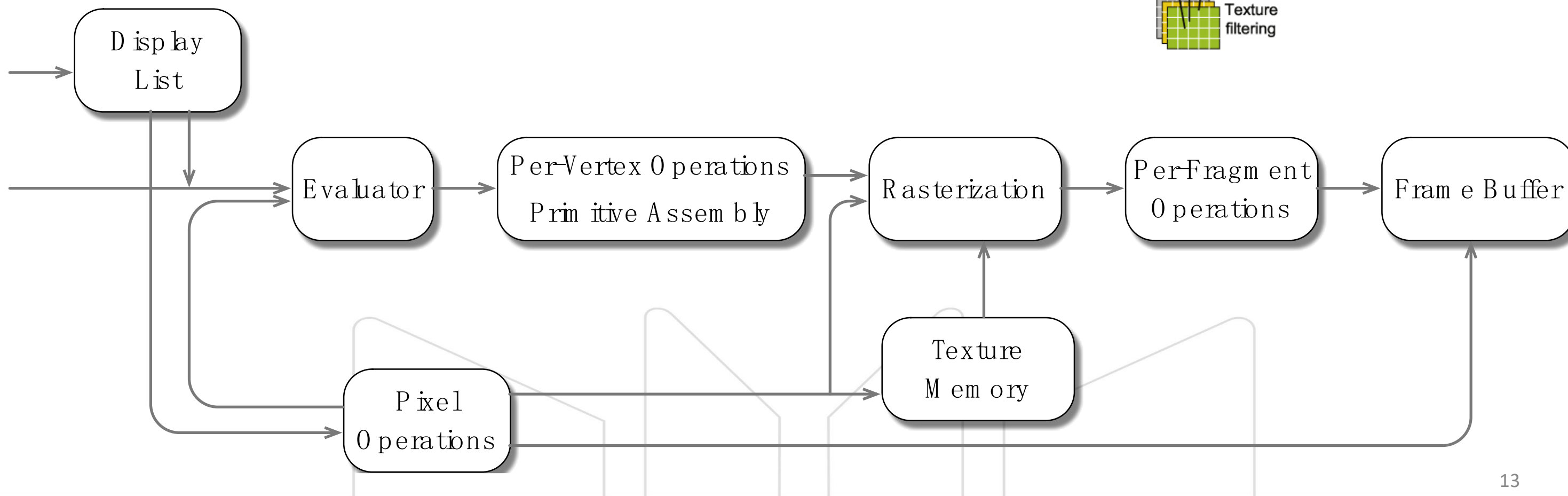
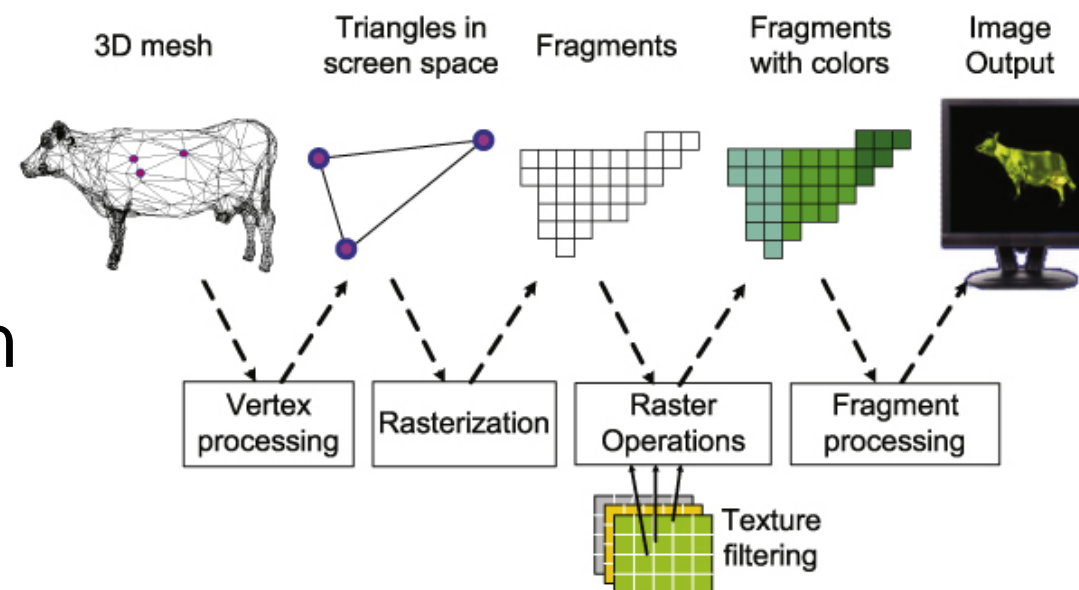
OpenGL工作流程



OpenGL简易pipeline

— 通过以下部分实现

- Display list, evaluator, rasterization per-fragment operations等



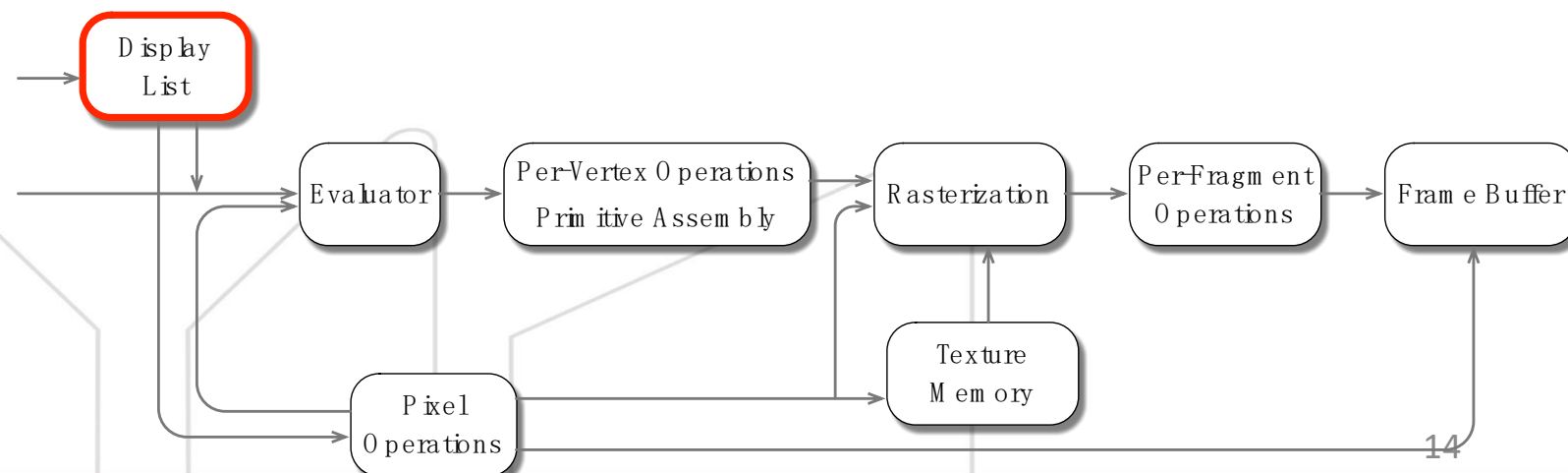
OpenGL简易pipeline

– Display list

- 存储在GPU上的OpenGL command列表
 - 称为“子程序 (subroutines)”
 - 可包含任意OpenGL command
 - 一旦建立就不能修改
- pre-compiled
- pre-computed transformation
- 优点：快！

– 参照编译语言vs解释语言

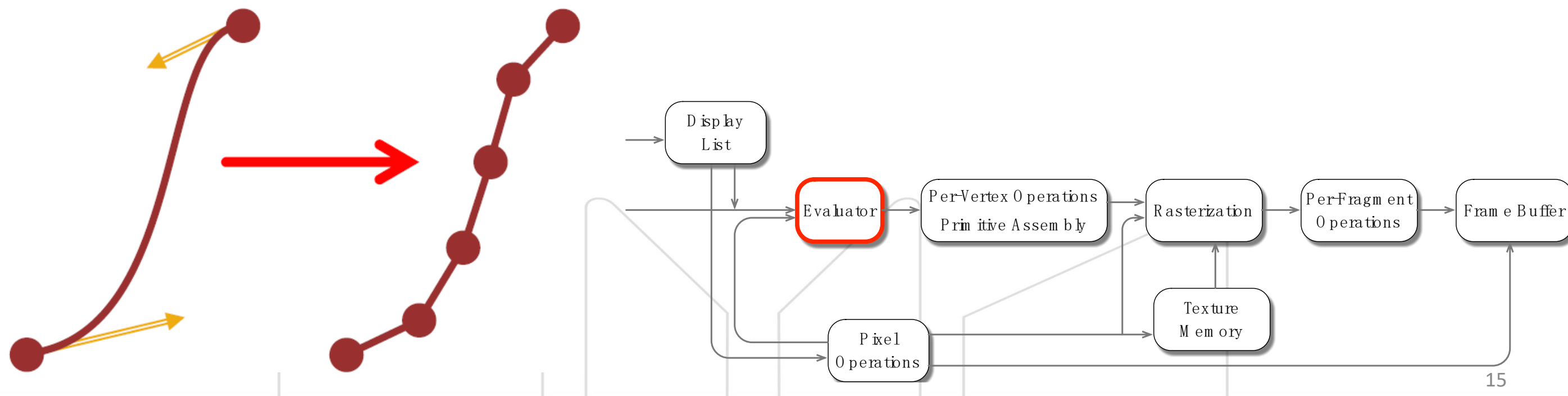
```
glNewList (list_name, GL_COMPILE);  
glColor3f (1.0, 0.0, 0.0);  
glBegin (GL_TRIANGLES);  
glVertex2f (0.0, 0.0);  
glVertex2f (1.0, 0.0);  
glVertex2f (0.0, 1.0);  
glEnd ();  
glTranslatef (1.5, 0.0, 0.0);  
glEndList ();
```



OpenGL简易pipeline

– Evaluator

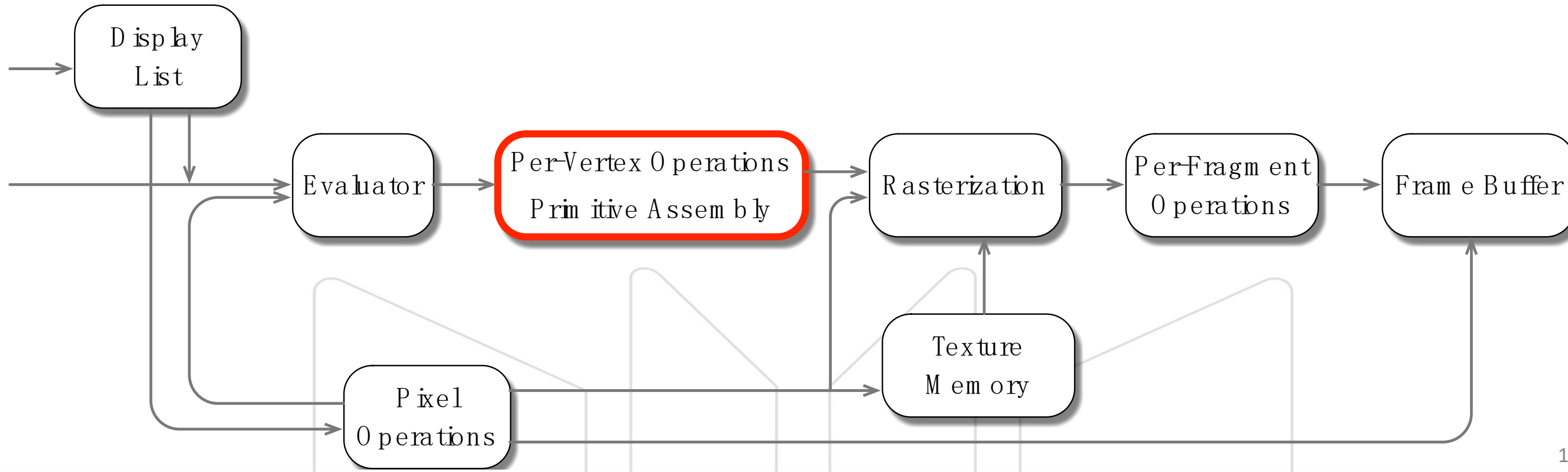
- 计算机的几何原语是离散化的顶点
- Evaluator使用控制点描述曲线/曲面
- 潜在问题：慢
 - 某些实现中使用display list获取最优效率



OpenGL简易pipeline

– Per-Vertex Operations与primitive assembly

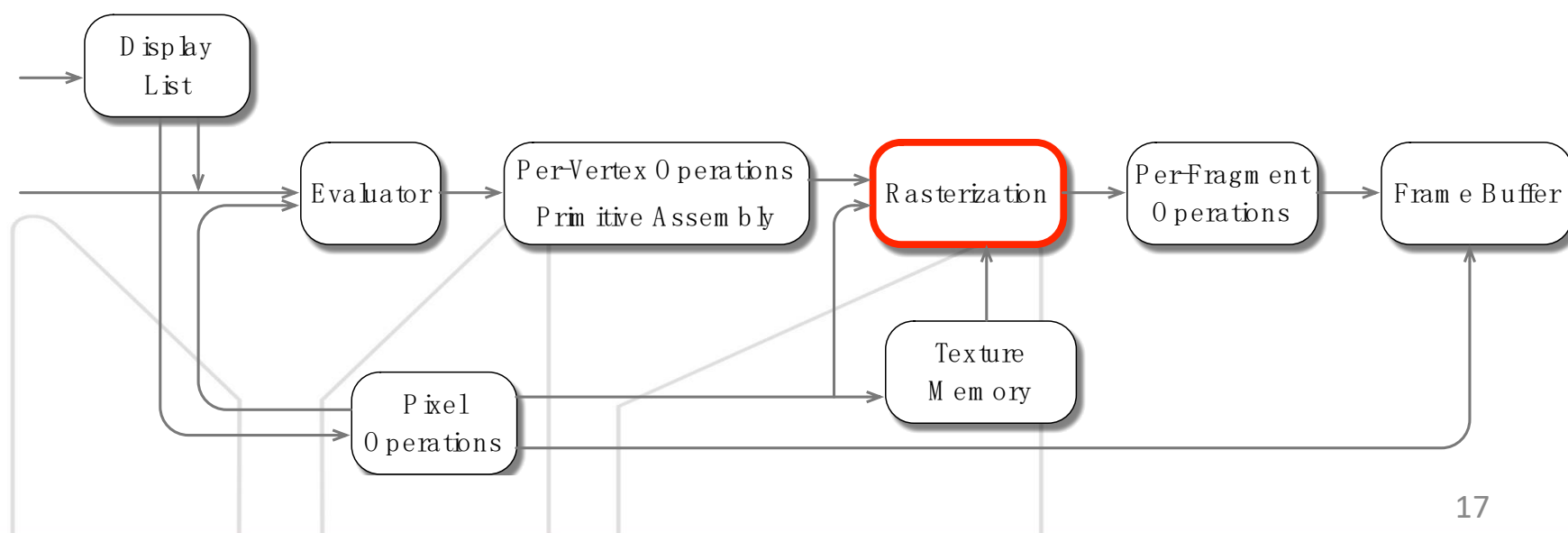
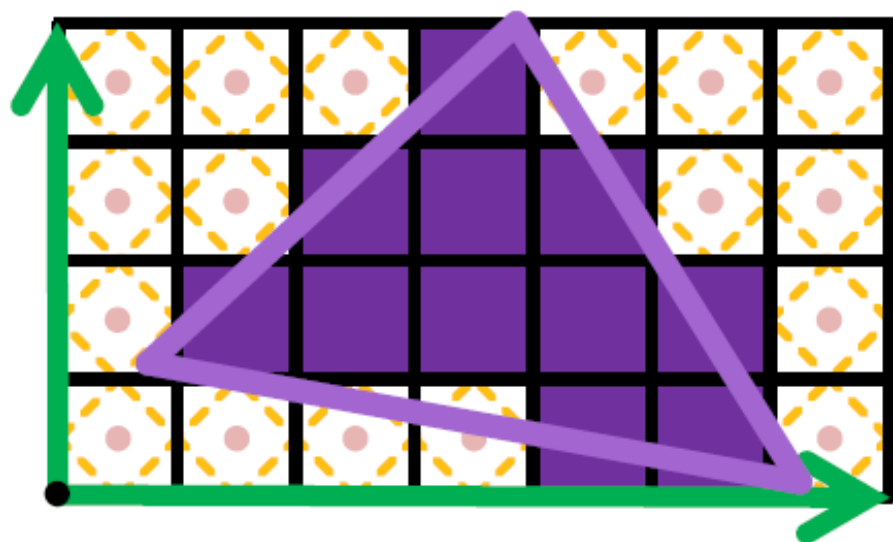
- 基于顶点进行操作
 - 空间变换等
- 将顶点组装成图元



OpenGL简易pipeline

– Rasterization (光栅化)

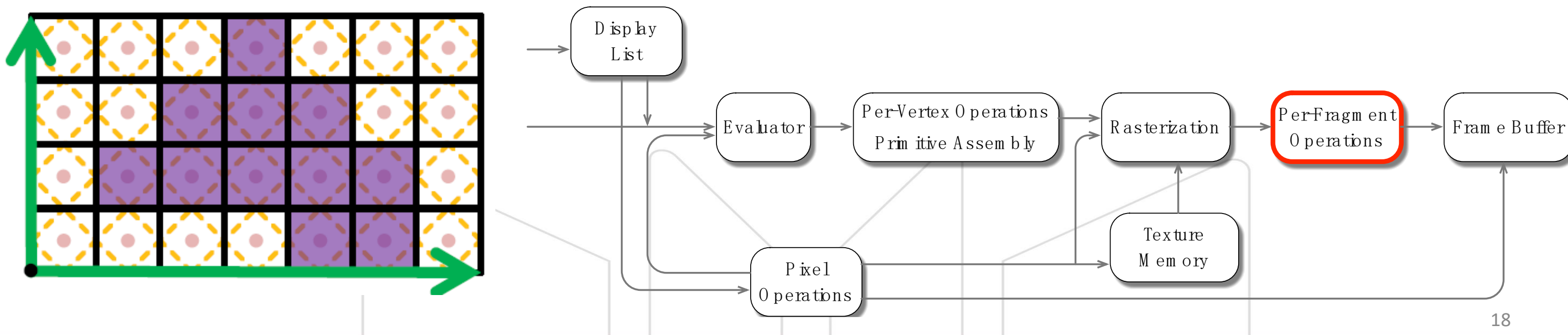
- 将图元转换为片段 (fragment)
 - 转换过程中, 直线的宽度, 样式, 点的大小支持抗锯齿等带来的覆盖计算都被考虑在内
- 每个方形片段对应frame buffer中的一个像素



OpenGL简易pipeline

– Per-fragment operations

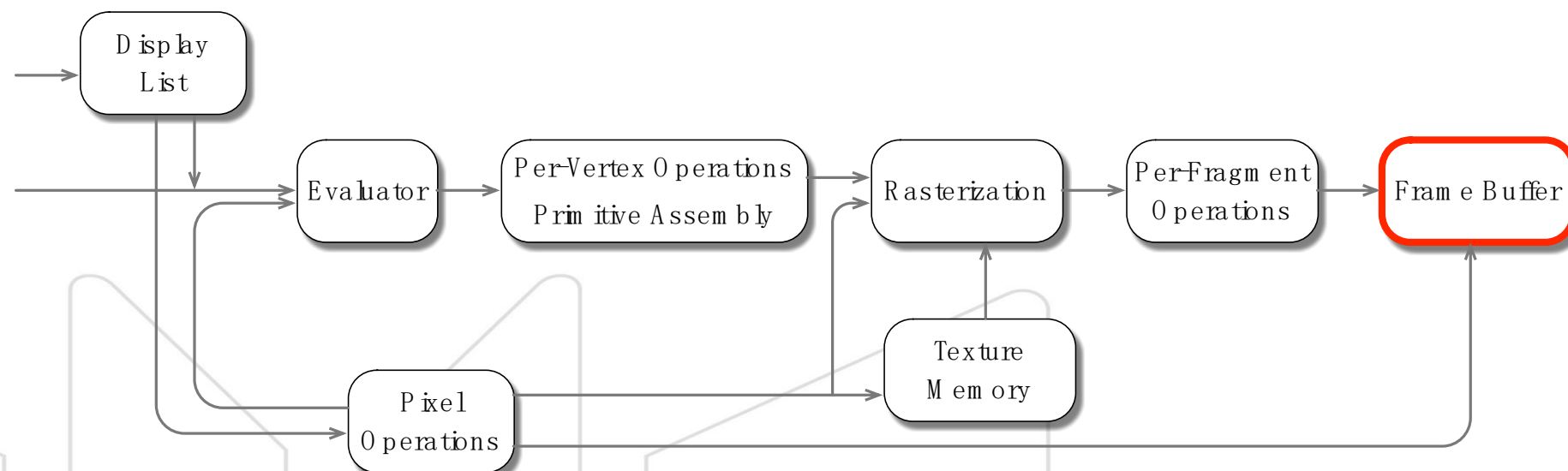
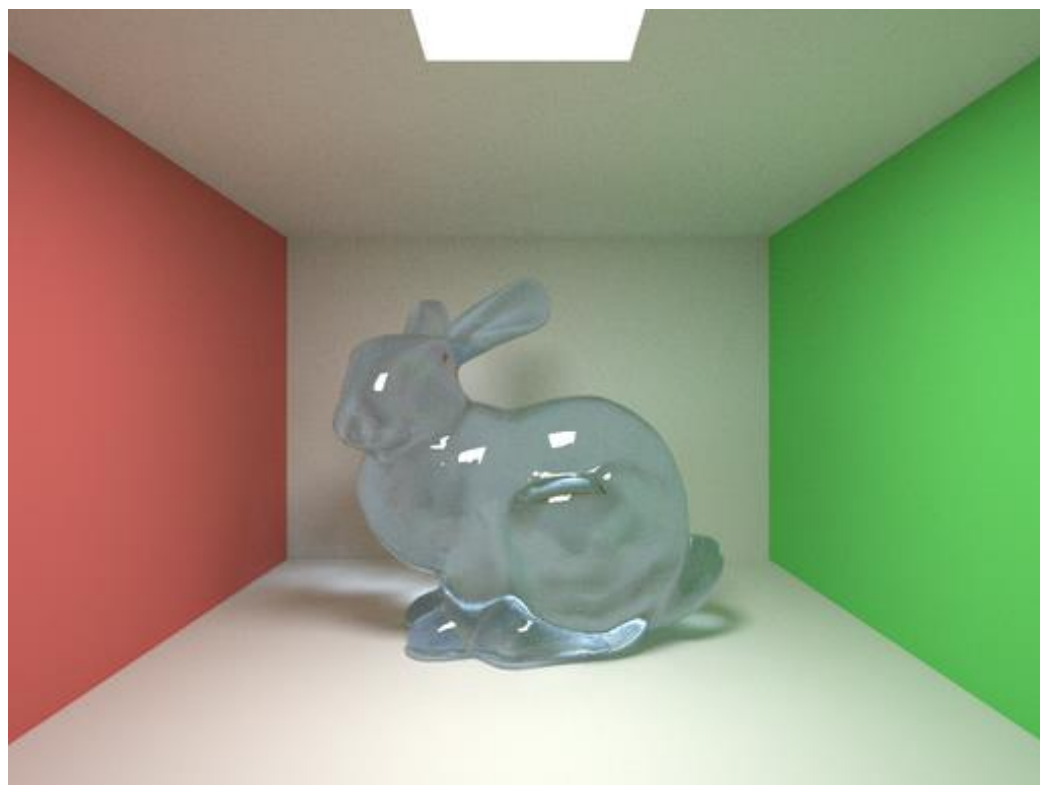
- 将frame buffer中同一像素对应的所有fragment混合，得到像素颜色
- 混合过程中考虑fragment的颜色、深度等信息



OpenGL简易pipeline

– Frame buffer

- 保存将要显示的帧的像素内容
- 传至屏幕进行显示



OpenGL函数

- 图元（primitives）：定义画什么：点、边、多边形
- 属性（attribute）：怎么画
- 变换（transformation）：怎么看与怎么组合
- 输入与控制：由工具库提供
 - GLUT, FLTK, Qt
- 查询



OpenGL相关API

OpenGL核心库

- OpenGL的一部分
- 以gl开头, 如glBegin()

glCallList
glCallLists
glColor
glEdgeFlag
glEnd
glEvalCoord

OpenGL核心库, 包含于Microsoft SDK, 用于常规的、核心的图形处理

GLU (OpenGL Utility Library)

- OpenGL的一部分
- 以glu开头, 如gluLookAt()

gluDisk
gluNewQuadric
gluPartialDisk
gluQuadricOrientation
gluQuadricTexture
gluSphere

OpenGL实用库, 包括纹理映射、坐标变换、多边形分化、绘制简单多边形实体

GLUT (OpenGL Utility Toolkit)

- 非OpenGL的一部分
- 提供窗口管理、鼠标、键盘、菜单功能
- 事件驱动 (event-driven)
- 缺乏现代GUI支持 (如, 滑动条)
- 以glut开头, 如glutLookAt()

OpenGL工具库, 以glut开头, 是不依赖于窗口平台的OpenGL工具包, 提供窗口相关的复杂的绘制功能

int	glutCreateWindow (const char *title)
void	glutDestroyWindow (int windowID)
void	glutFullScreen (void)
int	glutGetWindow (void)
void *	glutGetWindowData (void)
void	glutHideWindow (void)
void	glutIconifyWindow (void)
void	glutInitDisplayMode (unsigned int displayMode)

OpenGL函数命名方式

数据类型

b – byte
ub – unsigned byte
s – short
us – unsigned short
i – int
ui – unsigned int
f – float
d – double

函数功能

Vertex为指
明顶点位置

glVertex**3f**(x, y, z)

表明所属的库

gl: OpenGL核心库
glu: GLU
glut: GLUT

参数个数

2 – (x, y)
3 – (x, y, z)
4 – (x, y, z, w)

glVertex3f**v**(p)

**v – 表明参数使用
指针表示向量**

- OpenGL是什么？
- OpenGL如何工作？
- OpenGL程序结构简介

◉ 需要文件

– 头文件

- `#include <GL/gl.h>`, `#include <GL/glu.h>`, `#include <GL/glut.h>`
- MacOS可能为`#include <OpenGL/***.h>`

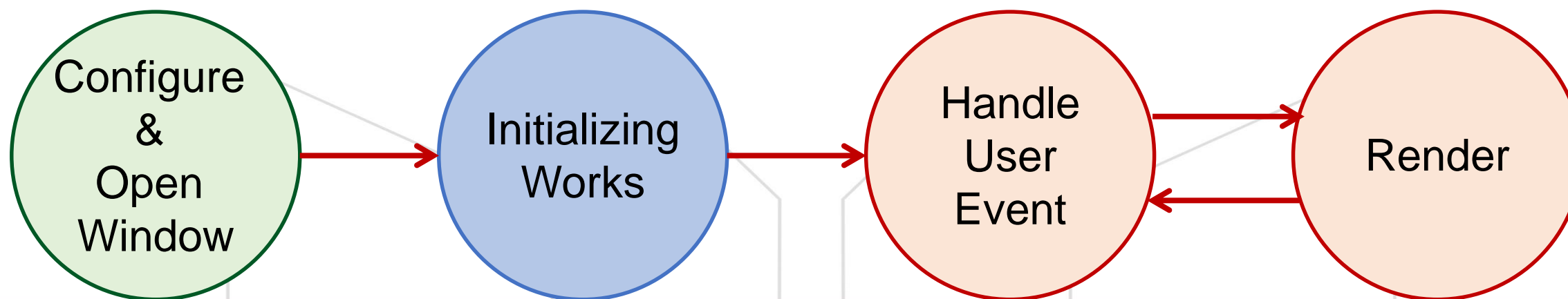
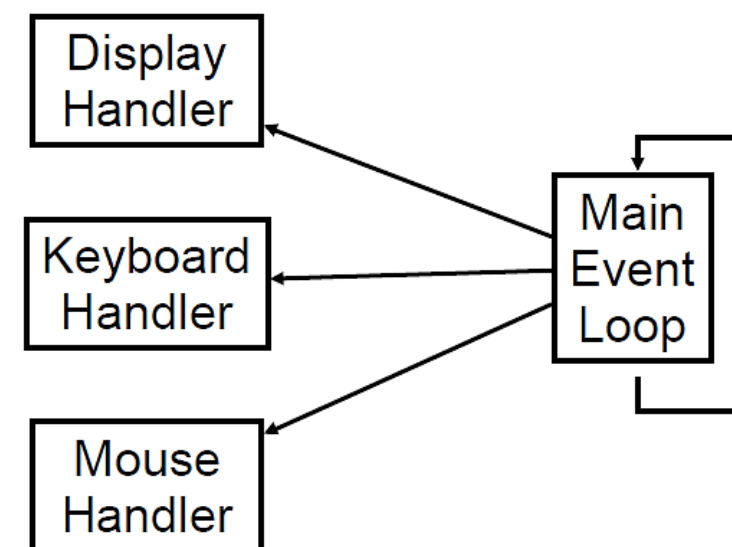
– 库文件

- 静态库: `opengl32.lib glu32.lib glut32.lib`
 - 放置于编译环境lib目录下
 - 或设置编译环境相关链接库目录
- 动态库: `opengl32.dll glu32.dll glut32.dll`
 - 放置于系统目录 (`c:/Windows/System32`; `c:/Windows/SysWOW64`)
 - 或dll目录 (`/usr/bin/`) 下
 - MacOS下使用Qt时, 将使用相关framework

基本程序结构

- 非面向对象
- 使用状态进行控制
- 无限循环

Event Driven Programming

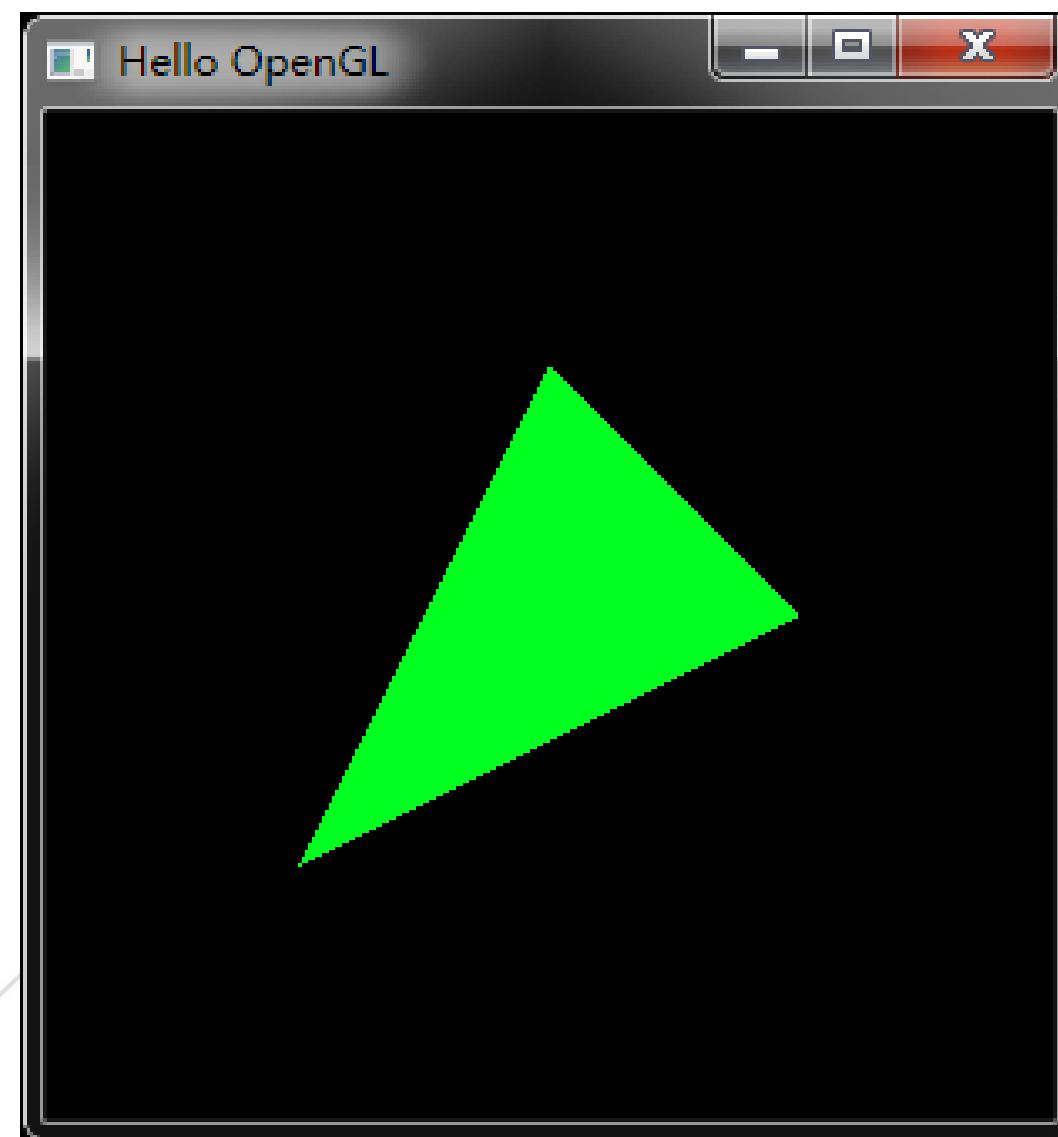


- OpenGL Hello World
 - 不到20行代码！

```
#include<gl/glut.h>

void renderScene(void)
{
    glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT);
    glBegin(GL_TRIANGLES);
    glColor3f(0.0f, 1.0f, 0.0f);
    glVertex3f(-0.5,-0.5,0.0);
    glVertex3f(0.5,0.0,0.0);
    glVertex3f(0.0,0.5,0.0);
    glEnd();
    glFlush();
}

int main(int argc, char *argv[])
{
    glutInit(&argc, argv);
    glutCreateWindow("Hello OpenGL");
    glutDisplayFunc(renderScene);
    glutMainLoop();
    return 0;
}
```



OpenGL Hello World

```
#include<gl/glut.h>

void renderScene(void)
{
    glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT);
    glBegin(GL_TRIANGLES);
    glColor3f(0.0f, 1.0f, 0.0f);
    glVertex3f(-0.5,-0.5,0.0);
    glVertex3f(0.5,0.0,0.0);
    glVertex3f(0.0,0.5,0.0);
    glEnd();
    glFlush();
}

int main(int argc, char *argv[])
{
    glutInit(&argc, argv);
    glutCreateWindow("Hello OpenGL");
    glutDisplayFunc(renderScene);
    glutMainLoop();
    return 0;
}
```

initialise GLUT

create window with title

**tell the program how
to redraw the window
(callback)**

Event Handler Loops

OpenGL Hello World

```
#include<gl/glut.h>

void renderScene(void)
{
    glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT);
    glBegin(GL_TRIANGLES);
    glColor3f(0.0f, 1.0f, 0.0f);
    glVertex3f(-0.5, -0.5, 0.0);
    glVertex3f(0.5, 0.0, 0.0);
    glVertex3f(0.0, 0.5, 0.0);
    glEnd();
    glFlush();
}

int main(int argc, char *argv[])
{
    glutInit(&argc, argv);
    glutCreateWindow("Hello OpenGL");
    glutDisplayFunc(renderScene);
    glutMainLoop();
    return 0;
}
```

clear the buffer

let's draw a triangle

using RGB color green

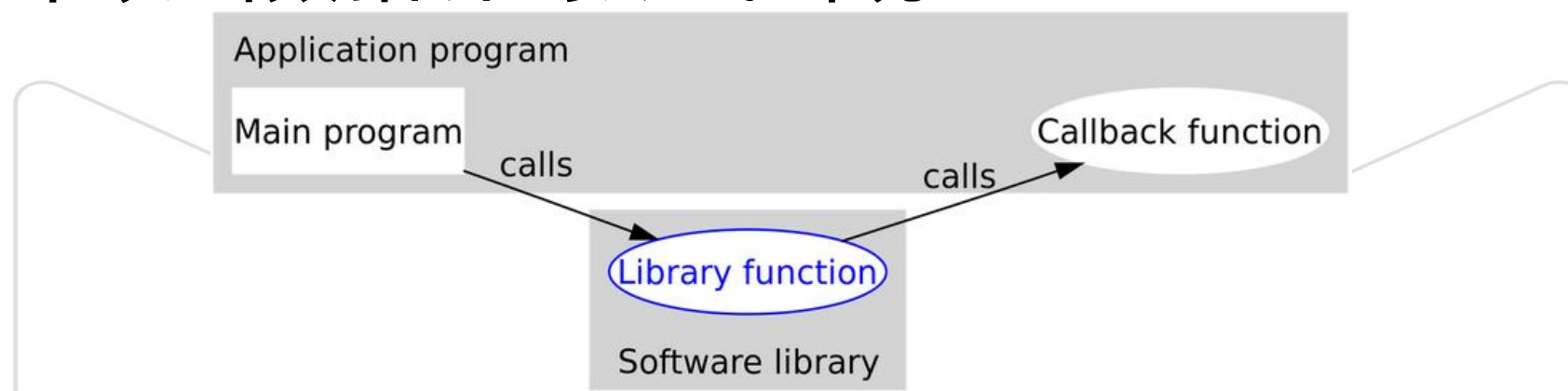
this is the 3 points of
the triangle

end of drawing

Do it!

回调函数 (callback)

- Wiki定义：在计算机程序设计中，回调函数，或简称回调（callback 即call then back 被主函数调用运算后会返回主函数），是指通过函数参数传递到其它代码的，某一块可执行代码的引用。这一设计允许了底层代码调用在高层定义的程序。
- 用途：
 - 允许函数调用者在运行时调整原始函数的行为
 - 处理错误信号（error signals）
- C/C++中常以函数指针的形式出现



OpenGL回调函数工作流程

- 主线程运行循环等待事件发生
 - 鼠标、键盘操作等
- GUI框架提供指明回调函数的机制
 - 常使用函数指针作为参数传递
 - 将函数指针与特定事件联系
 - 当事件发生时调用对应的回调函数
- 回调函数常带有参数
 - 事件调度器通过参数传递额外信息
 - 如，鼠标操作的x与y坐标，键盘的键值，等

• GLUT回调函数举例

Display callback
当窗口redraw时调用

```
void redraw(){  
    glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);  
  
    glBegin(GL_QUADS);  
    glColor3f(1.0f, 0.0f, 0.0f);  
    glVertex2f(-0.5f, 0.5f);  
    glVertex2f(-0.5f, 0.5f);  
    glVertex2f(0.5f, -0.5f);  
    glVertex2f(-0.5f, -0.5f);  
    glEnd();  
  
    glutSwapBuffers();  
}
```

Reshape callback
当窗口resize时调用

```
void reshape(int w, int h){  
    glViewport(0.0, 0.0, w, h);  
  
    glMatrixMode(GL_PROJECTION);  
    glLoadIdentity();  
    glOrtho(0.0, w, 0.0, h, -1.0, 1.0);  
  
    glMatrixMode(GL_MODELVIEW);  
    glLoadIdentity();  
}
```

• GLUT回调函数举例

Keyboard callback

当常规按键被按下时调用

```
void keyboardCB(unsigned char key,  
                 int x, int y)  
{  
    switch(key){  
        case 'a':  
            cout<<"a is pressed"<<endl;  
            break;  
    }  
}
```

当特殊按键被按下时调用

```
void special(int key, int x, int y){  
    switch(key){  
        case GLUT_F1_KEY:  
            cout<<"F1 is pressed"<<endl;  
            break;  
    }  
}
```

Mouse callback

当鼠标按键被按下时调用

```
void mousebutton(int button, int state,  
                 int x, int y)  
{  
    if (button==GLUT_LEFT_BUTTON  
        && state==GLUT_DOWN){  
        rx = x;  
        ry = winHeight-y;  
    }  
}
```

当鼠标移动时调用

```
void motion(int x, int y){  
    rx = x;  
    ry = winHeight-y;  
}
```

• GLUT回调函数举例

– 用户控制结束程序

- OpenGL程序通常处于一个无限循环中，系统难以自动决定何时结束程序
- 使用回调函数由用户控制结束

```
void mousebutton(int button, int state, int x, int y)
{
    if (button==GLUT_RIGHT_BUTTON && state==GLUT_DOWN)
    {
        exit(0);
    }
}
```

• GLUT回调函数使用

– 将函数指针通过特定函数与事件关联

- 在`init()`与`glutMainLoop()`之间通过相应的函数调用完成

```
int main(int argc, char** argv){  
    glutInit(&argc, argv);  
    glutInitDisplayMode(GLUT_DOUBLE | GLUT_RGB);  
    glutInitWindowSize(250, 250);  
    glutInitWindowPosition(100, 100);  
    glutCreateWindow(argv[0]);  
  
    init();  
    glutDisplayFunc(display);  
    glutReshapeFunc(reshape);  
    glutMouseFunc(mouse);  
    glutMainLoop();  
}
```


- OpenGL是什么？
- OpenGL如何工作
- OpenGL程序结构简介
- OpenGL基本概念与语句

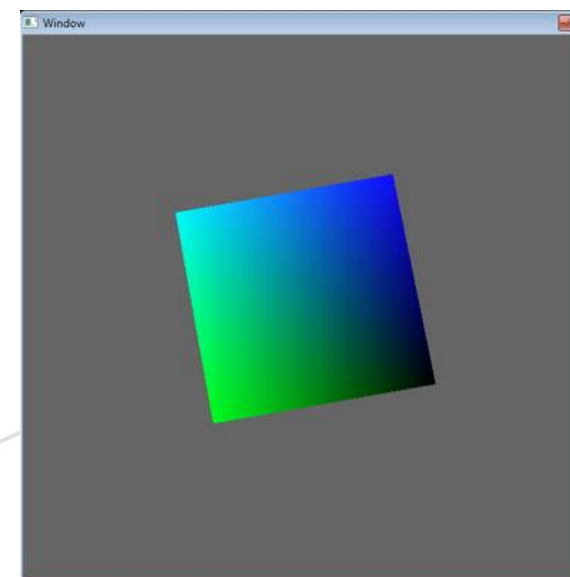
• 上下文（context）与视口（Viewport）

– OpenGL **context** 存储关于当前OpenGL实例相关的所有信息

- 当前绘制所使用的颜色、光照、光源信息、OpenGL函数调用所设置的状态和状态属性等
- 一个OpenGL进程可以有多个context
- 每个context对应一个可独立的绘制行为

– **Viewport** 是屏幕中依据context进行绘制的一个矩形区域

- 可以是窗口中的一部分或整个窗口
- 缺省使用整个窗口

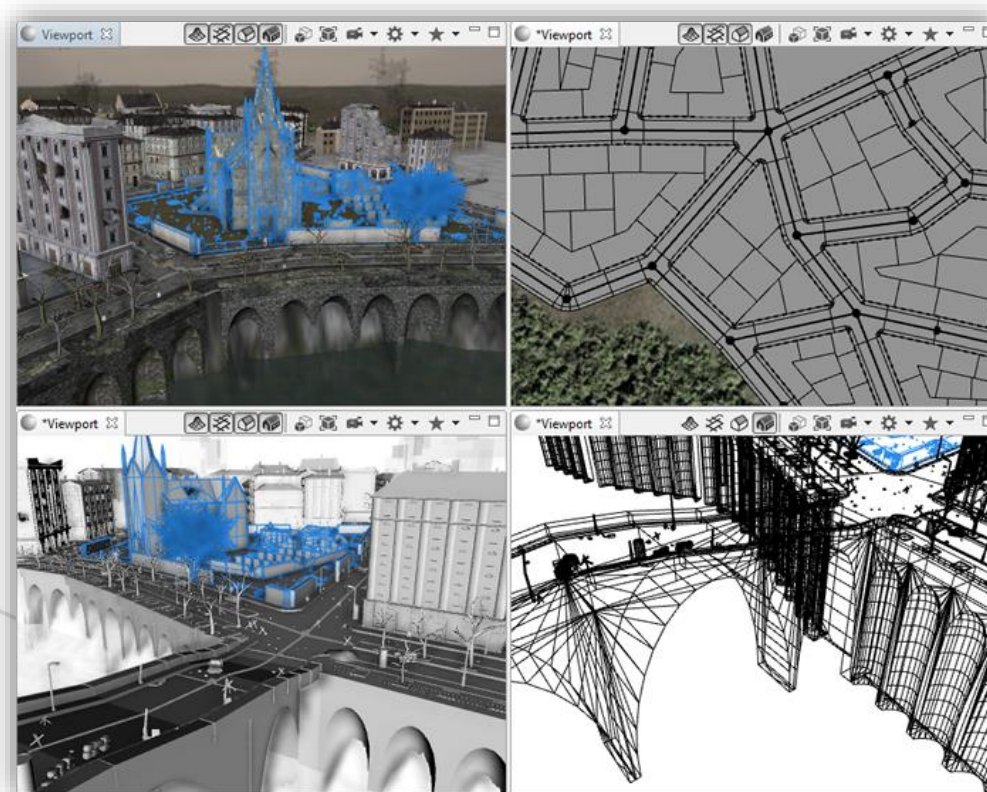


● 视口 (Viewport)

– 视口指明当前绘制区域

- 从摄像机 (camera) 的角度看，视口为产生图片的大小
 - 将所有三维几何物体投影至视口所对应的像素区域

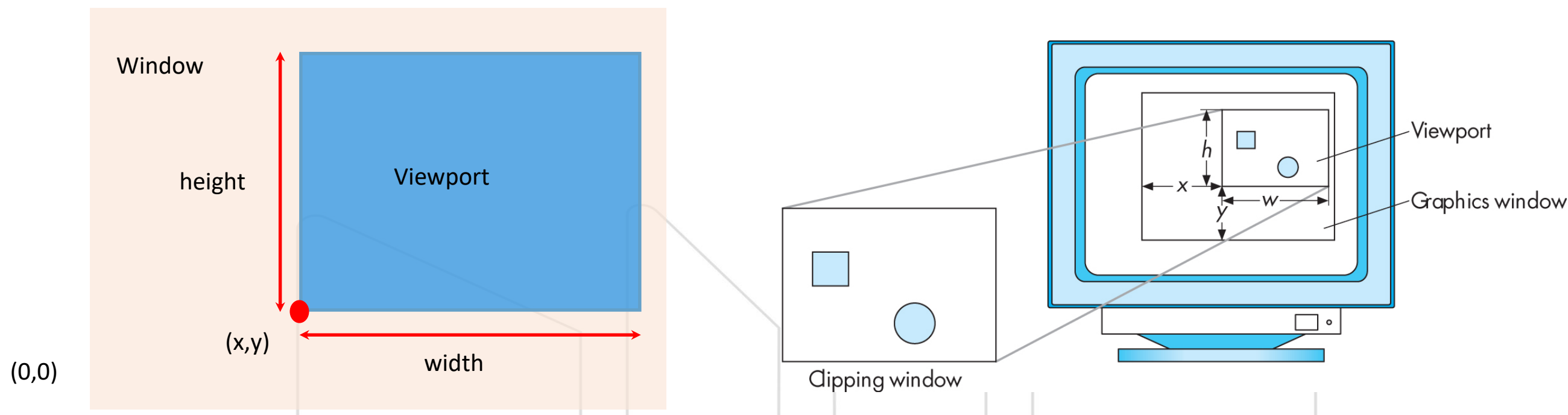
– 同一个窗口中可以通过多个视口进行绘制从而达到分屏效果



视口 (Viewport)

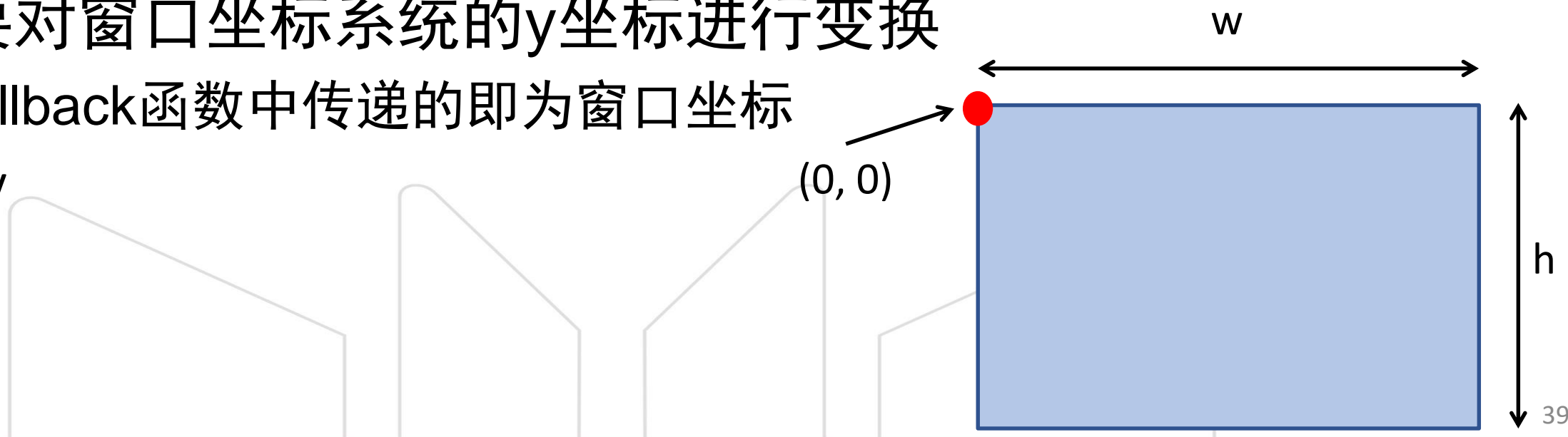
— 设置视口

- **glViewport**(int x, int y, int width, int height)
- x与y分别为视口左下角在当前窗口中的位置
- width与height指明视口的大小
- 视口的纵横比应当与当前观看的空间一致



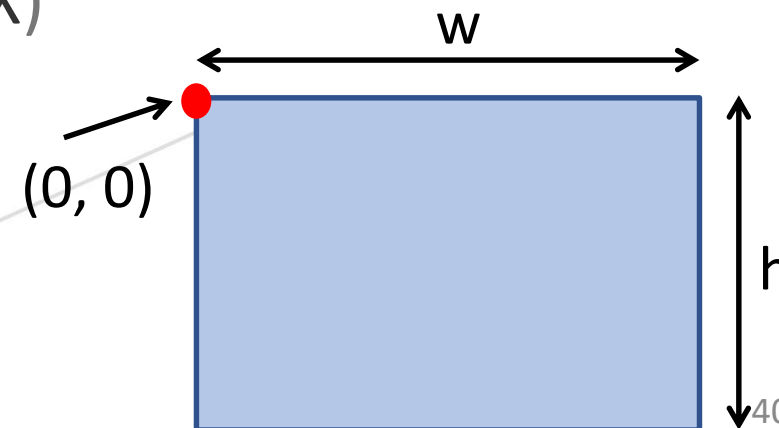
坐标系统

- OpenGL世界坐标系（world coordinate）与窗口的坐标系统不同
 - OpenGL世界坐标系原点在左下角（y轴自底向上）
 - 不以像素为单位
 - 窗口坐标系统远点在左上角（y轴自顶向下）
 - 以像素为单位
 - 原因在于显示器以自顶向下的方式刷新显示内容
- 通常需要对窗口坐标系统的y坐标进行变换
 - 如，callback函数中传递的即为窗口坐标
 - $y = h - y$



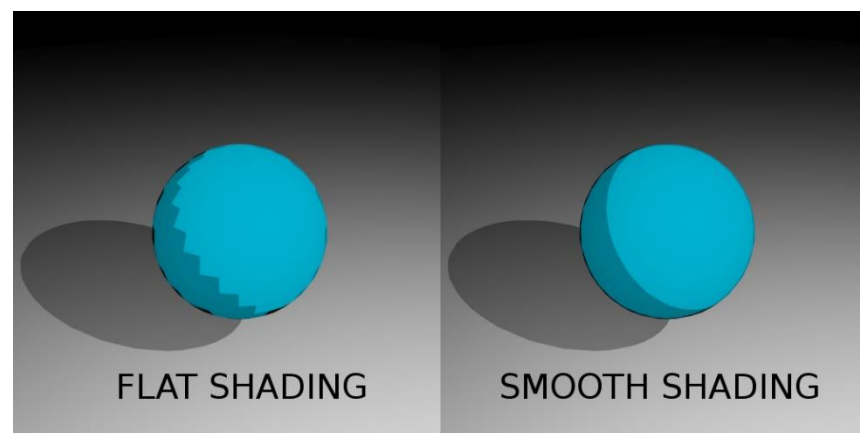
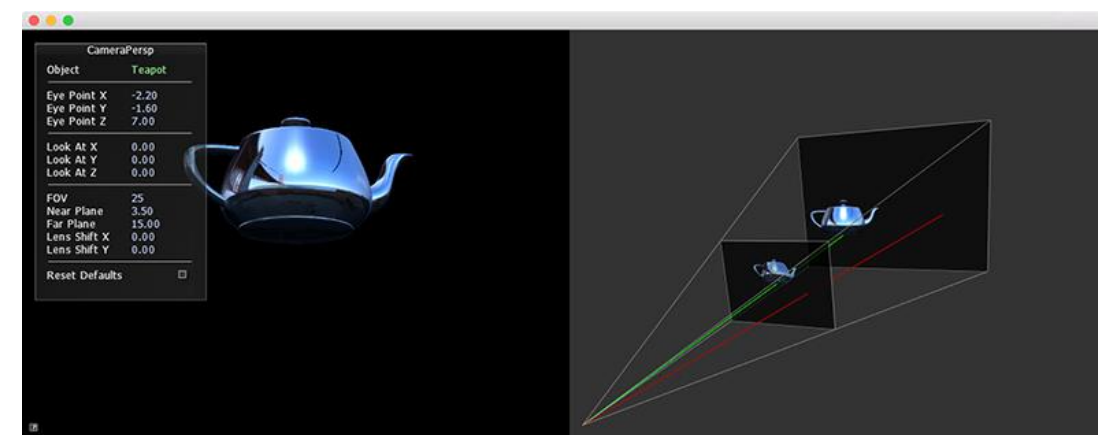
坐标系统

- 通常需要对窗口坐标系统的y坐标进行变换
 - 如，callback函数中传递的即为窗口坐标
 - $y = h - y$
 - 变换中需要知道窗口高度h
 - 在程序运行过程中，窗口高度可能发生改变（resize）
 - 可使用resize事件的callback函数在窗口大小发生变化时记录高度
 - 使用GLUT函数 **glutGet**(GLUT_WINDOW_HEIGHT)
 - 使用OpenGL函数 **glGetIntegerv**(GL_SCISSOR_BOX)

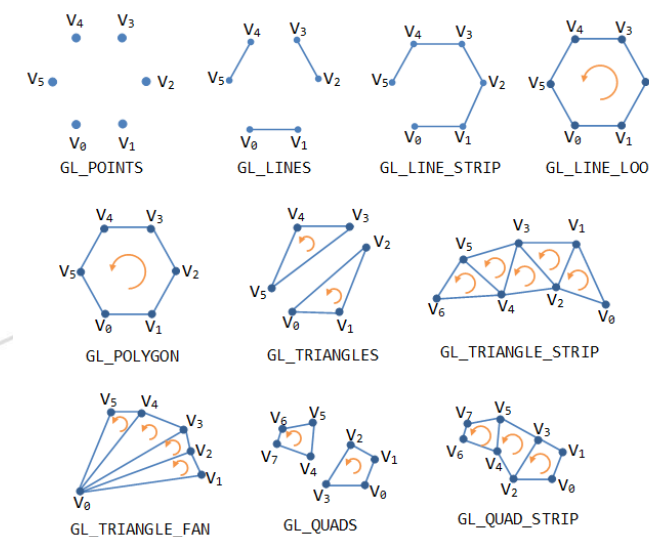


OpenGL具有丰富的状态

- current color
- camera properties (location, orientation, field of view, etc.)
- lighting model (flat, smooth, etc.)
- type of primitive
- line width, line style, ...
- 及其他...



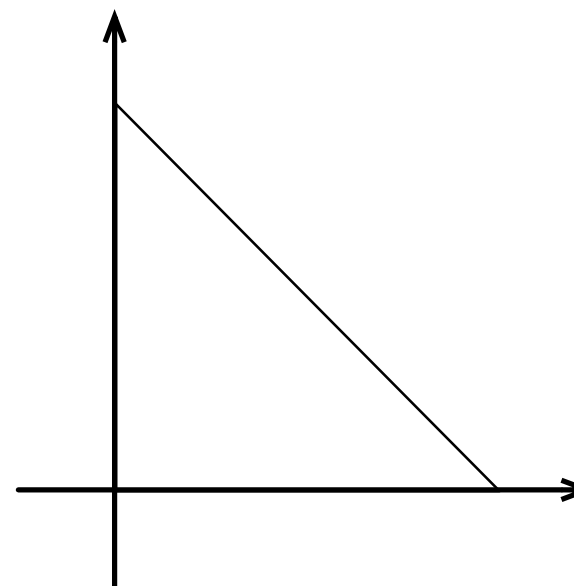
PATTERN	FACTOR	
0x00FF	1	_____
0x00FF	2	_____
0x0C0F	1	____ _
0x0C0F	3	_____
0xAAAA	1	- - - - -
0xAAAA	2	- - - - -
0xAAAA	3	- - - - -
0xAAAA	4	- - - - -



OpenGL状态设置

- 状态一经设置，在下次设置前将保持不变

```
glColor3f(0.0f, 0.0f, 1.0f);  
glVertex2f(0.0f, 0.0f);  
glVertex2f(1.0f, 0.0f);  
glColor3f(1.0f, 0.0f, 0.0f);  
glVertex2f(0.0f, 1.0f);
```



- OpenGL有大量状态变量通过`glEnable()`与`glDisable()`进行设置
 - 如，`glEnable(GL_LIGHT0)`，`glEnable(GL_DEPTH_TEST)`，等

OpenGL输入

– 几何体以vertex list的形式输入OpenGL

- **glVertex**^{*}(), ^{*} = nt OR ntv, n - **number** (2, 3, 4),
t - **type** (i = integer, f = float, etc.), v - **vector**

Suffix	Data Type	Typical Corresponding C-Language Type	OpenGL Type Definition
b	8-bit integer	signed char	GLbyte
s	16-bit integer	short	GLshort
i	32-bit integer	long	GLint, GLsizei
f	32-bit floating-point	float	GLfloat, GLclampf
d	64-bit floating-point	double	GLdouble, GLclampd
ub	8-bit unsigned integer	unsigned char	GLubyte, GLboolean
us	16-bit unsigned integer	unsigned short	GLushort
ui	32-bit unsigned integer	unsigned long	GLuint, GLenum, GLbitfield

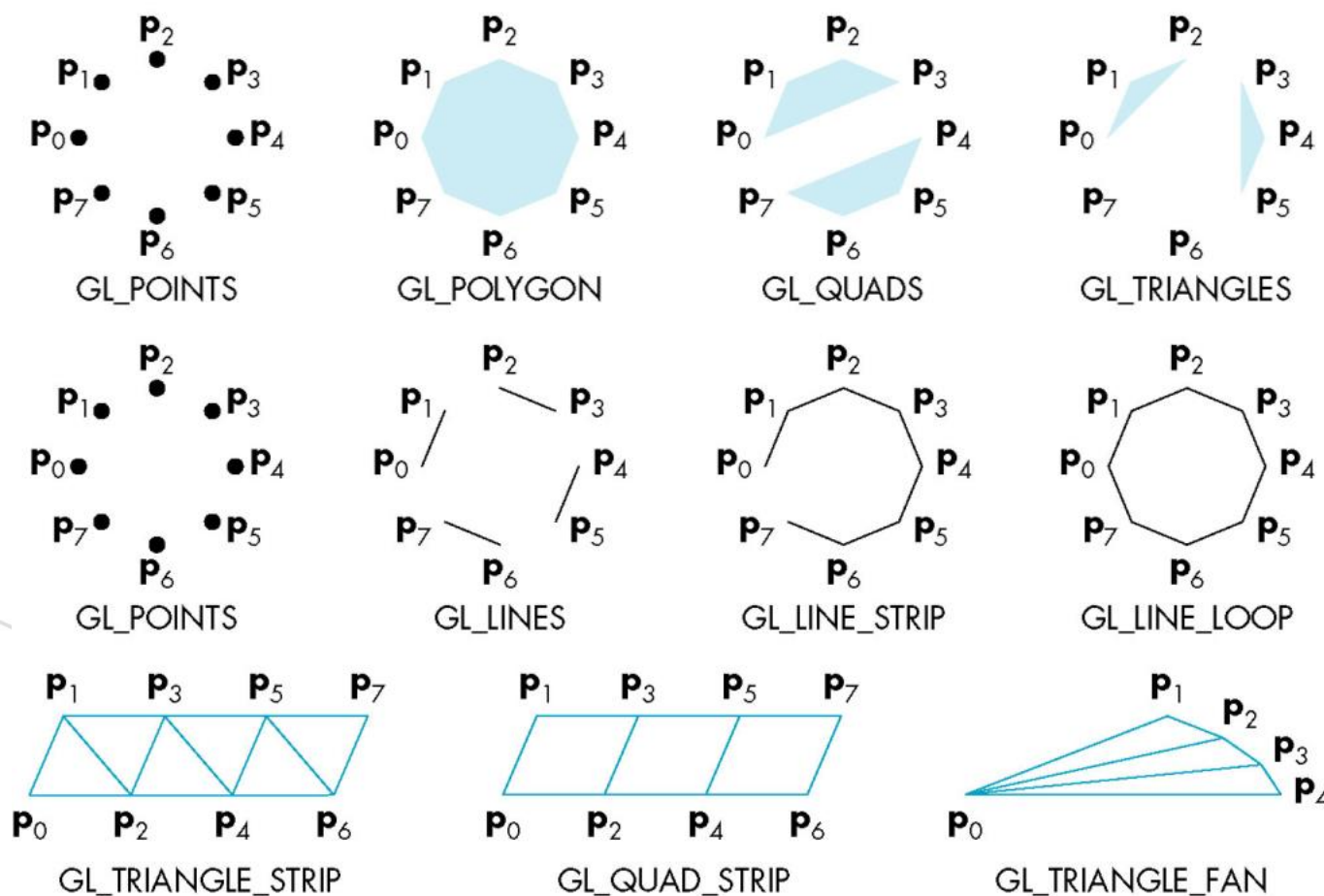
OpenGL输入

– 几何体以vertex list的形式输入OpenGL

- **glVertex***(), * = nt OR ntv, n - **number** (2, 3, 4),
t - **type** (i = integer, f = float, etc.), v - **vector**
- 如, **glVertex2i**(5, 4);
 - 指明坐标为(5, 4)的顶点, 默认位于平面 $z=0$
 - **2** 指明顶点位置为2维向量
 - **i** 指明向量中每一个分量为整型
- **glVertex3f**(.25f, .25f, .5f);
 - 指明坐标为(.25f, .25f, .5f)的顶点
- **double vertex**[3] = {1.0, .33, 3.14159}; **glVertex3dv**(vertex);
 - 指明坐标为(1.0, .33, 3.14159)的顶点
 - **v** 指明输入为单个数组而非多个数字

OpenGL primitive types

- 几何体都以顶点的方式输入，但可以构成不同基本类型
 - 这些基本类型称为primitives（图元）
 - 点、线、三角形、四边形、多边形，等



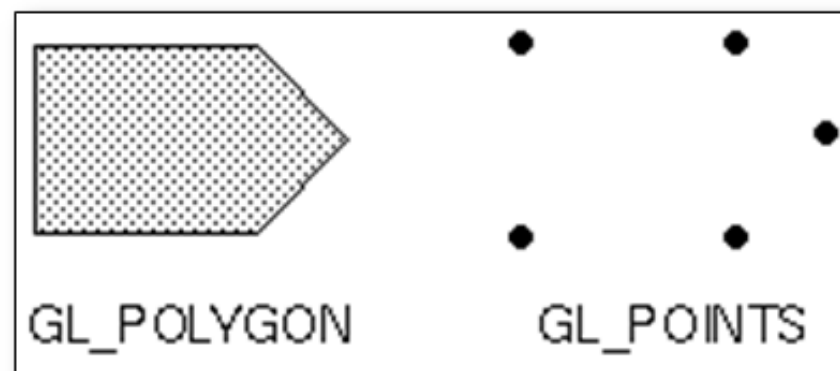
OpenGL primitive types

– 指明primitive type

```
glBegin(primitiveType);  
// A list of glVertex* calls goes here  
// ...  
glEnd();
```

– 不同primitive type的效果

```
glBegin(GL_POLYGON);  
glVertex2f(0.0f, 0.0f);  
glVertex2f(0.0f, 3.0f);  
glVertex2f(3.0f, 3.0f);  
glVertex2f(4.0f, 1.5f);  
glVertex2f(3.0f, 0.0f);  
glEnd();
```



● 多边形显示模式

– **glPolygonMode**(GLenum face, GLenum mode);

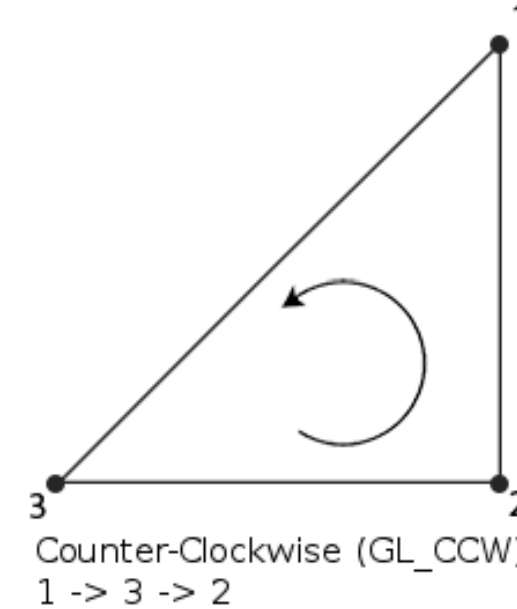
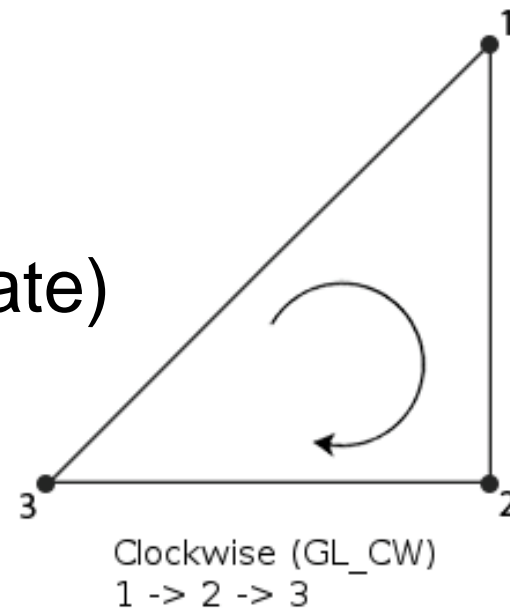
- 指明多边形如何显示
- face: GL_FRONT, GL_BACK, GL_FRONT_AND_BACK
- mode: GL_FILL, GL_LINE, GL_POINT

– **glFrontFace**(GLenum mode);

- 指明如何判断前向面 (in window coordinate)
- mode: GL_CCW, GL_CW

– **glCullFace**(GLenum mode);

- 指明剔除前向或（及）后向面
- mode: GL_FRONT, GL_BACK, GL_FRONT_AND_BACK
 - GL_FRONT_AND_BACK下只绘制点和线，不绘制面
- 需要打开或关闭GL_CULL_FACE
- **glEnable**(GL_CULL_FACE), **glDisable**(GL_CULL_FACE)



OpenGL颜色

– OpenGL语句使用RGBA指定颜色

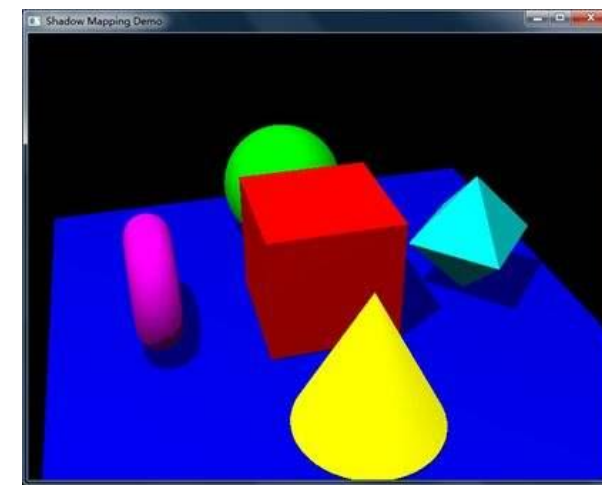
- 浮点型每个分量的范围为[0.0, 1.0]，而整型为[0, 255]

– 指定及应用背景颜色

- `glClearColor(0.0f, 0.0f, 0.0f, 0.0f);`
- `glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);`

– 指定物体颜色

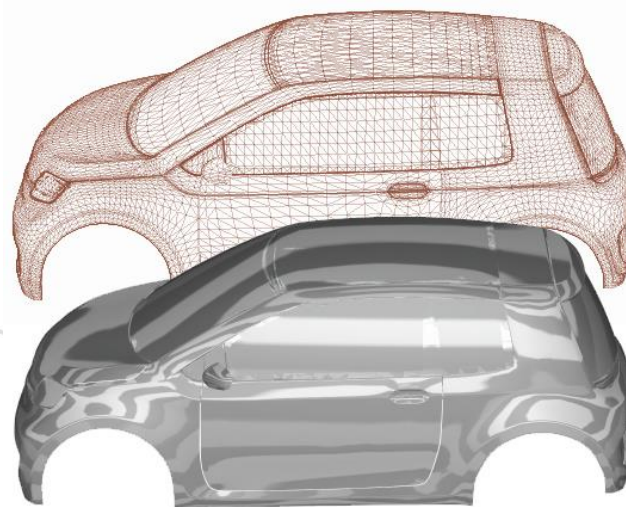
- `glColor3f(1.0f, 1.0f, 1.0f);`
- `glColor3i(255, 255, 255);`
- `glColor3fv(color_array);`
- `glColor4f(1.0f, 1.0f, 1.0f, 1.0f);`



● 绘制其他物体

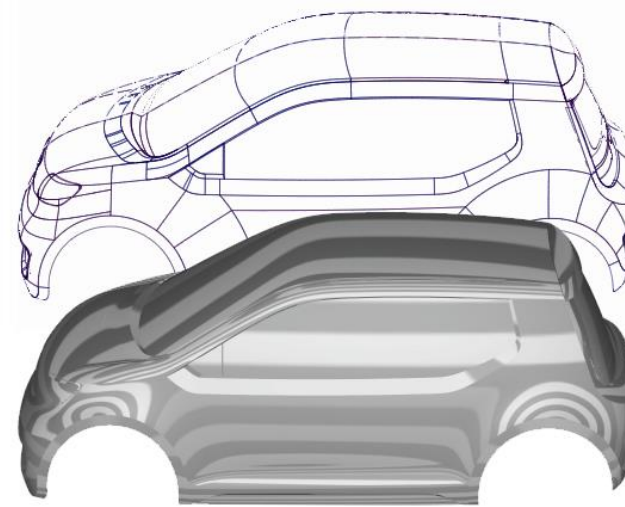
- GLU中有绘制圆柱体，圆锥体，及更复杂的NURBS曲面的函数
 - NURBS：非均匀有理B样条（Non-Uniform Rational B-Spline）
 - 1991年，ISO将NURBS作为定义工业产品几何形状的唯一数学方法
 - 贝塞尔曲线的一般形式
- GLUT中有绘制球体，正方体等的函数

Polygon model



Poor surface quality

NURBS model



Pure, smooth highlights

• 完成OpenGL绘制

- OpenGL命令并非立即执行
 - 所有命令被置于一个command buffer中
- 当绘制命令结束时，需要将这些命令发送至显卡
 - 强制所有命令开始执行
 - **glFlush()**: 异步执行（函数调用后立即返回）
 - **glFinish()**: 同步执行（绘制结束后返回）



OpenGL中的矩阵（两类）

– 建模观察矩阵（**ModelView**）

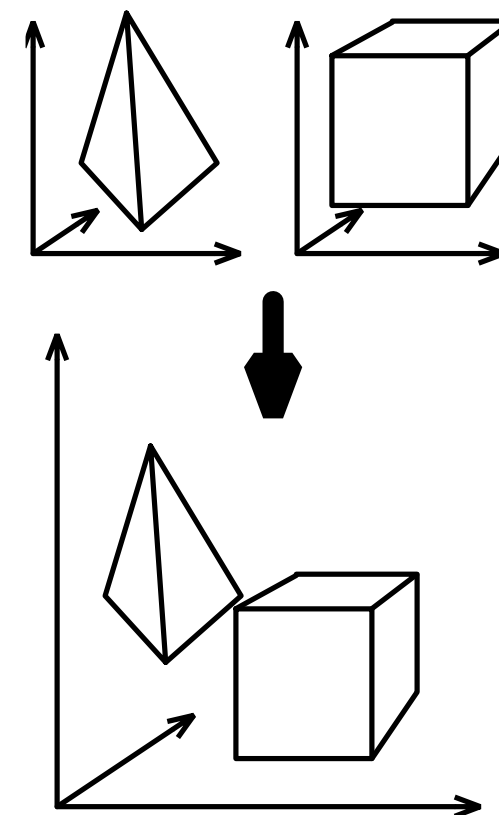
- 三维到三维
- 将顶点从object coordinate转至eye coordinate

– 投影矩阵（**Projection**）

- 三维到二维（某种意义上说）
- 将顶点从eye coordinate转至clip coordinate

– 所有矩阵被置于两个矩阵堆栈之中

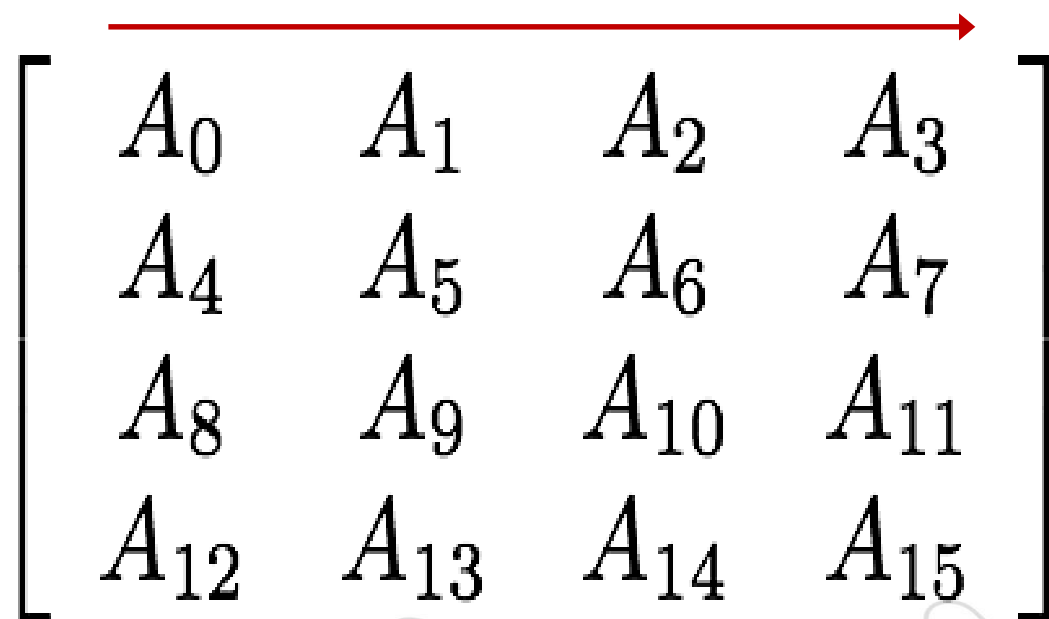
- ModelView matrix (GL_MODELVIEW)
- Projection matrix (GL_PROJECTION)
- 在使用矩阵进行变化前，应先切换至相应的堆栈



```
glMatrixMode(GL_MODELVIEW)
//now we are in modelview matrix stack!
//do modelview transformation here...
glMatrixMode(GL_PROJECTION)
//now we are in projection matrix stack!
//do projection transformation here...
```

OpenGL中的矩阵

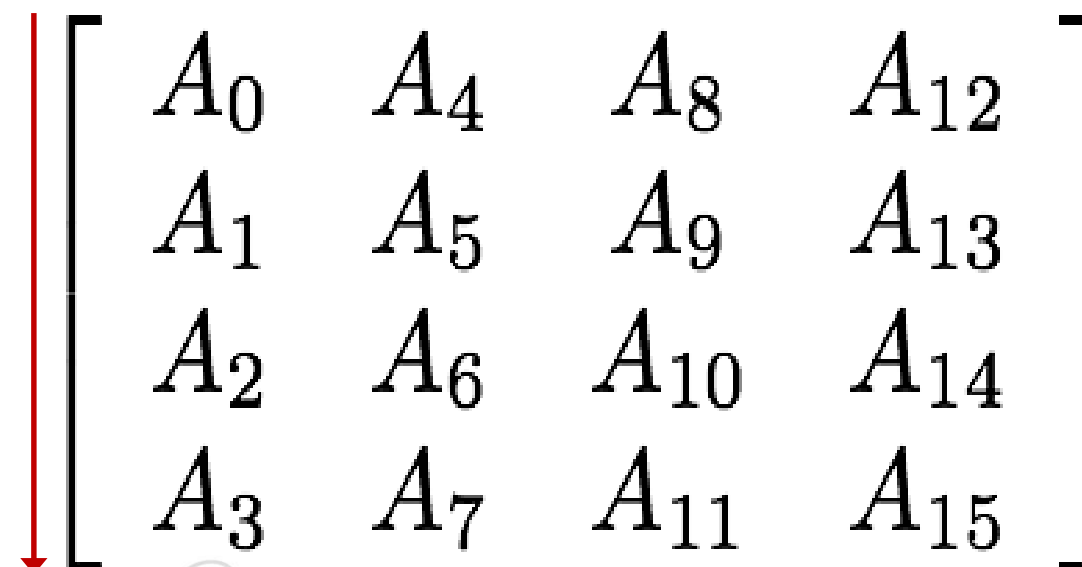
- C/C++中矩阵是以row-major的方式存储于内存中的
- OpenGL中矩阵是以column-major的方式存储的



A 4x4 matrix is shown with elements A_0 through A_{15} arranged in rows. A red arrow above the matrix points from left to right, indicating the storage order is row-major.

$$\begin{bmatrix} A_0 & A_1 & A_2 & A_3 \\ A_4 & A_5 & A_6 & A_7 \\ A_8 & A_9 & A_{10} & A_{11} \\ A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} \end{bmatrix}$$

Row-Major Order



A 4x4 matrix is shown with elements A_0 through A_{15} arranged in columns. A red arrow to the left of the matrix points from top to bottom, indicating the storage order is column-major.

$$\begin{bmatrix} A_0 & A_4 & A_8 & A_{12} \\ A_1 & A_5 & A_9 & A_{13} \\ A_2 & A_6 & A_{10} & A_{14} \\ A_3 & A_7 & A_{11} & A_{15} \end{bmatrix}$$

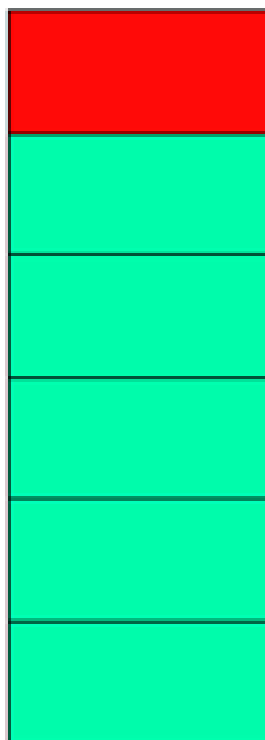
Column-Major Order

OpenGL中的矩阵

– 矩阵操作永远作用于栈顶矩阵

- 可使用glPushMatrix()和glPopMatrix()改变栈的深度

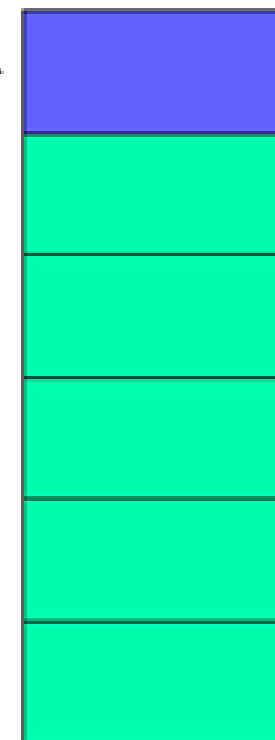
Top matrix
In the stack



X

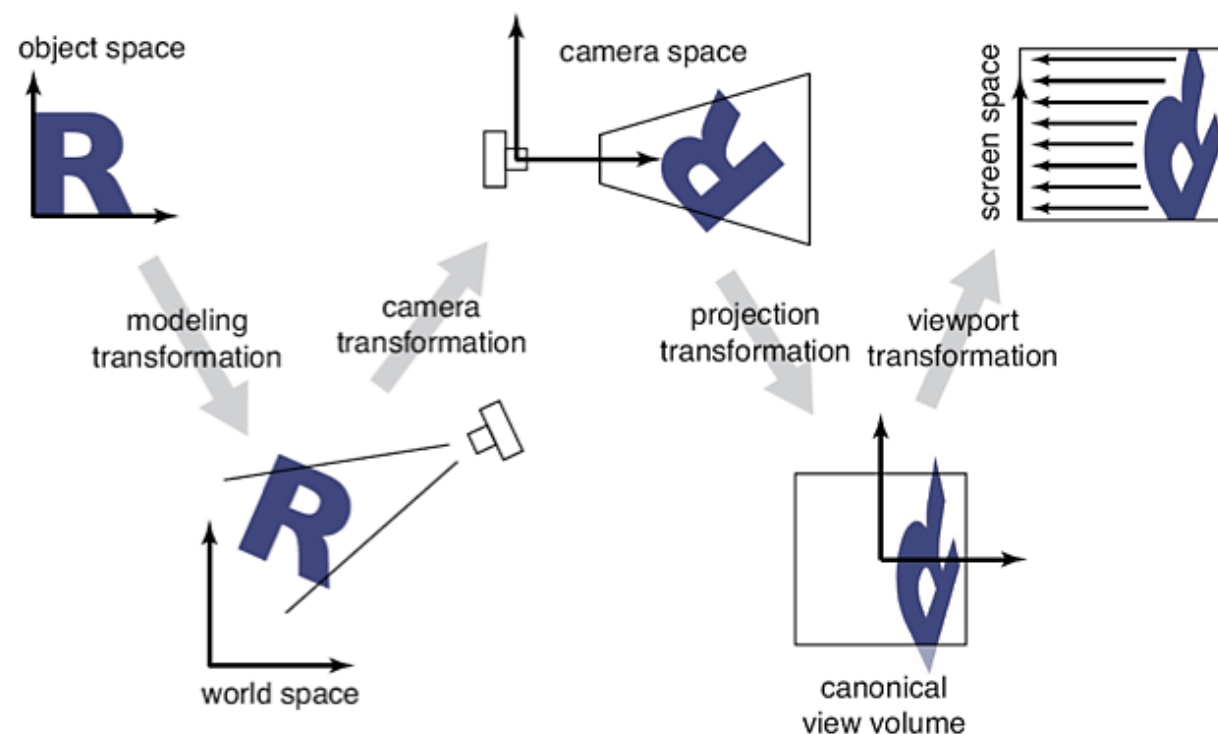


Translation matrix
(glTranslatef)



OpenGL中的矩阵

- 建模变换 (modeling transformation)
 - 对物体进行旋转、平移、缩放、及其组合而成的变换
- 观察变换 (viewing transformation)
 - 放置摄像头并调整其朝向



OpenGL中的矩阵

- 在OpenGL中modeling与viewing transformation被合并为一个矩阵，即modelview矩阵
 - Modeling transformation: 放置物体
 - Viewing transformation: 放置摄像头
- 其原因可想象在现实世界中如何在镜头中平移一个场景
 - 移动场景内的所有物体或移动摄像头



OpenGL中的矩阵

- OpenGL中所有变换都通过 4×4 矩阵完成
 - 无需手动构建矩阵，而是使用如下函数
- **glRotate{fd}**(angle, x, y, z);
 - 将场景以向量(x, y, z)为旋转轴，旋转angle度
- **glTranslate{fd}**(x, y, z);
 - 将场景平移(x, y, z)
- **glScale{fd}**(x, y, z);
 - 将场景沿三个坐标轴方向分别缩放(x, y, z)

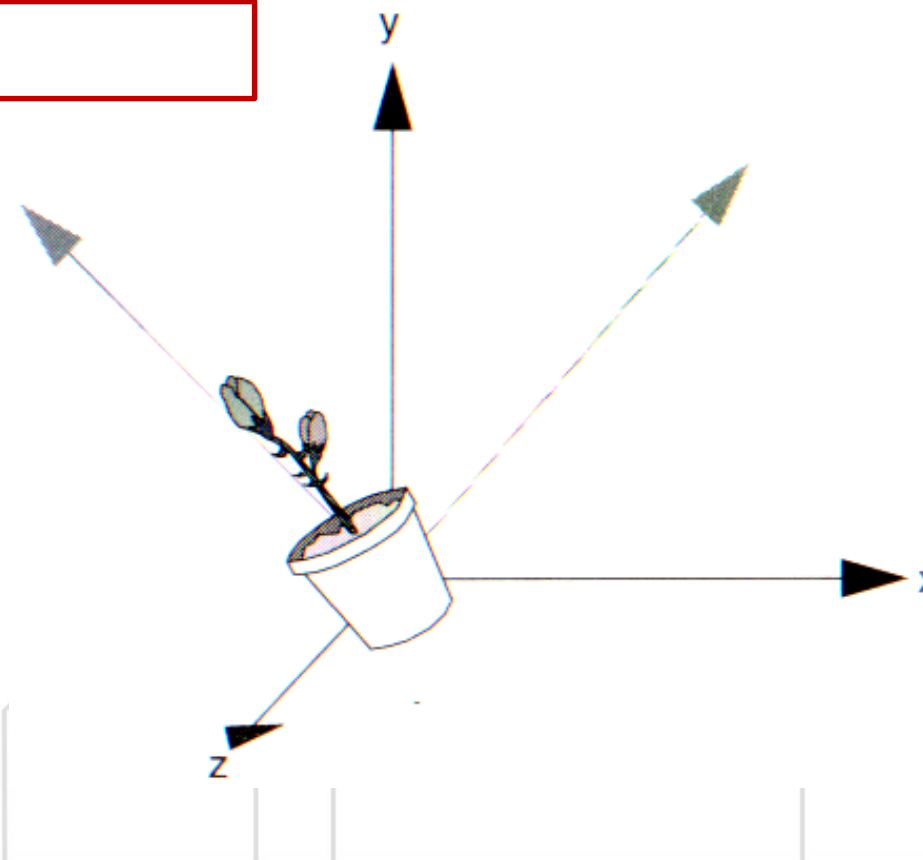


OpenGL中的矩阵

– `glRotate{fd}(angle, x, y, z);`

- 将current matrix乘以旋转矩阵，从而将场景中所有物体以从原点到的射线为旋转轴，逆时针旋转angle度（degree）

```
glRotatef(45.0f, 0.0f, 0.0f, 1.0f);
```

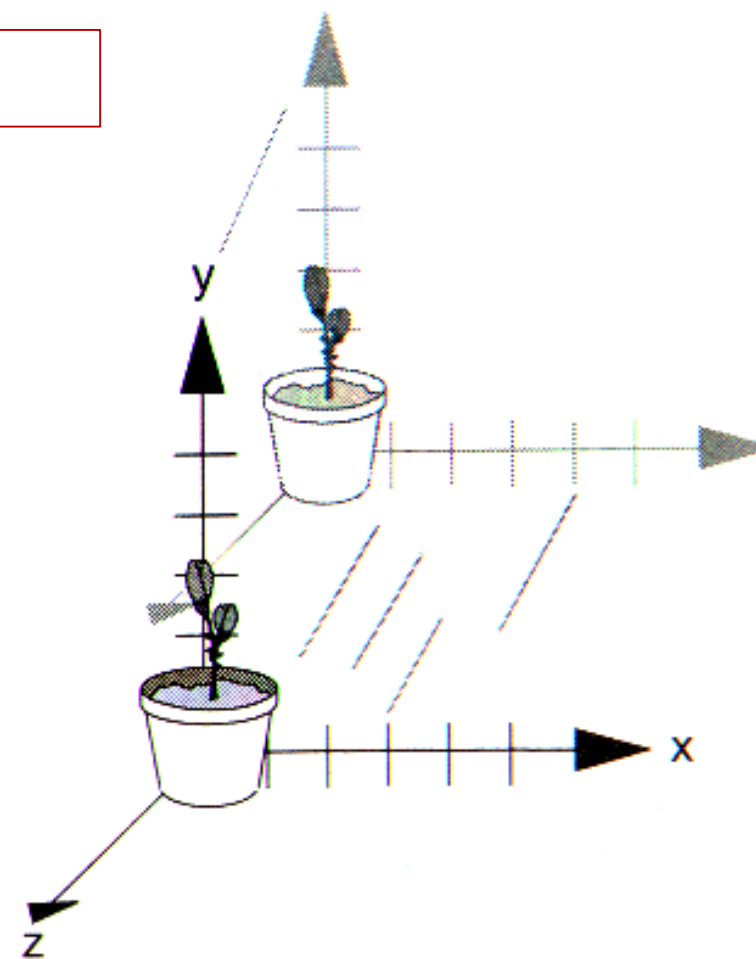


OpenGL中的矩阵

– `glTranslate{fd}(x, y, z);`

- 将current matrix乘以平移矩阵，从而将场景中所有物体平移(x, y, z)

```
glTranslate(0.0f, 0.0f, -1.0f);
```

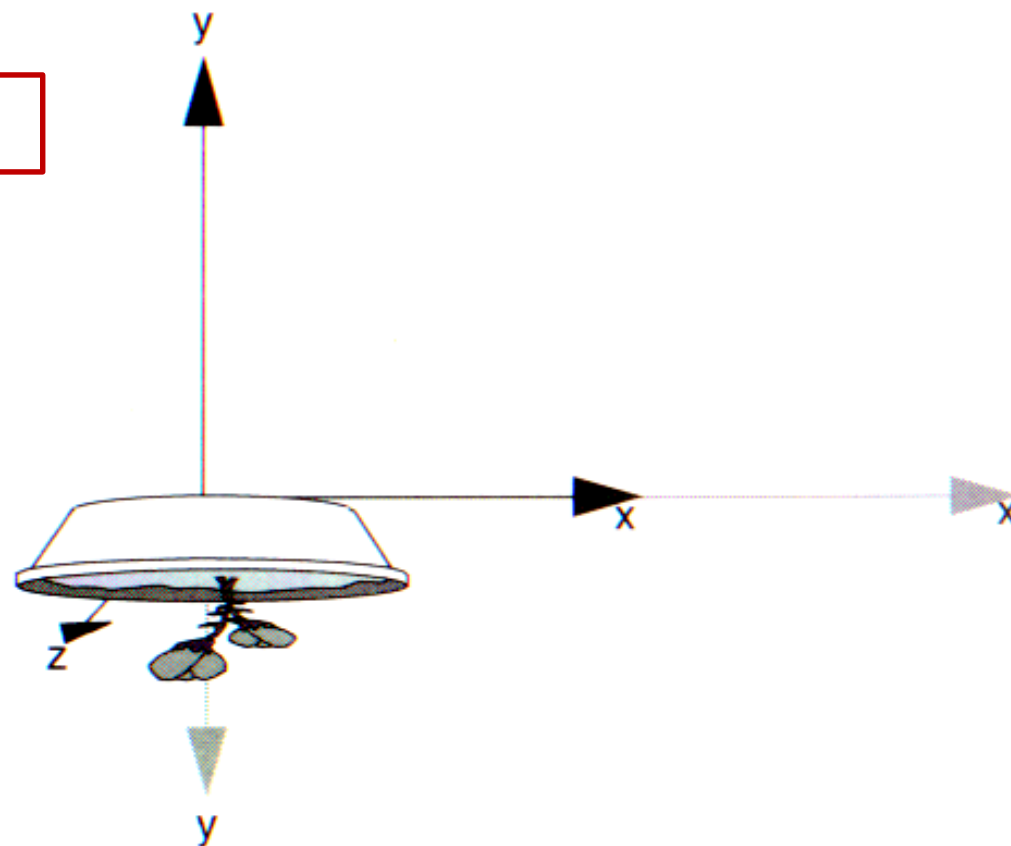


OpenGL中的矩阵

– `glScalef(x, y, z);`

- 将current matrix乘以缩放矩阵，从而使场景中所有物体沿三个坐标轴方向分别缩放(x, y, z)

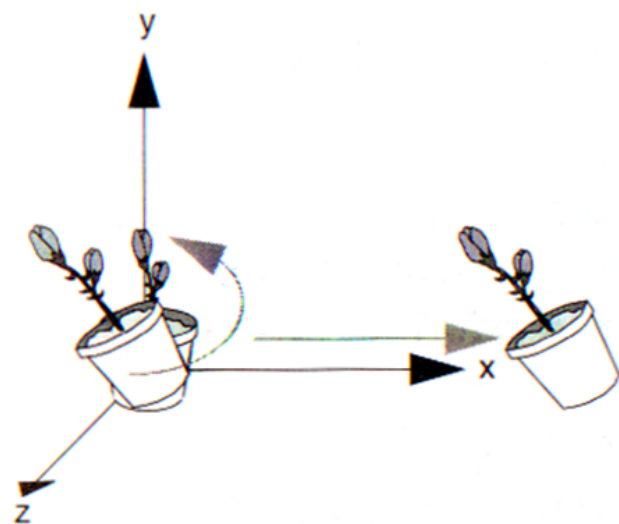
```
glScalef(2.0f, -0.5f, 1.0f);
```



OpenGL中的矩阵

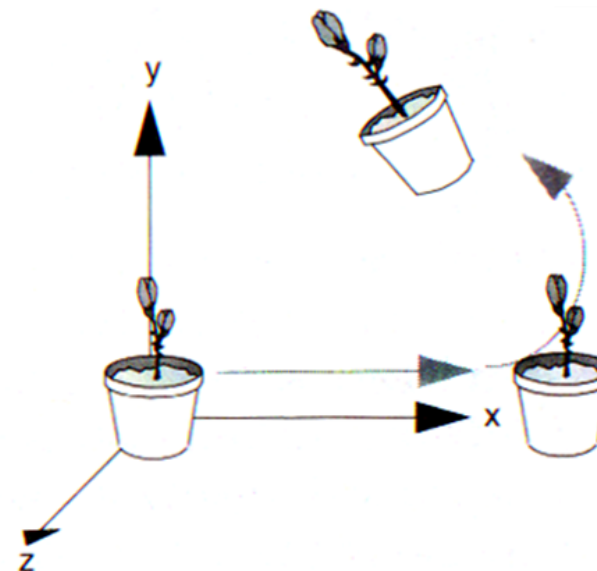
– OpenGL中，**最后调用的变换最先应用**

- 一系列变换是通过不断对栈顶矩阵（current matrix）右乘得到
- 可以从变换顶点坐标与变换坐标系两个角度去考虑



Rotate then Translate

```
glTranslate(0.0f, 0.0f, -1.0f);  
glRotatef(45.0f, 0.0f, 0.0f, 1.0f);  
drawObject();
```



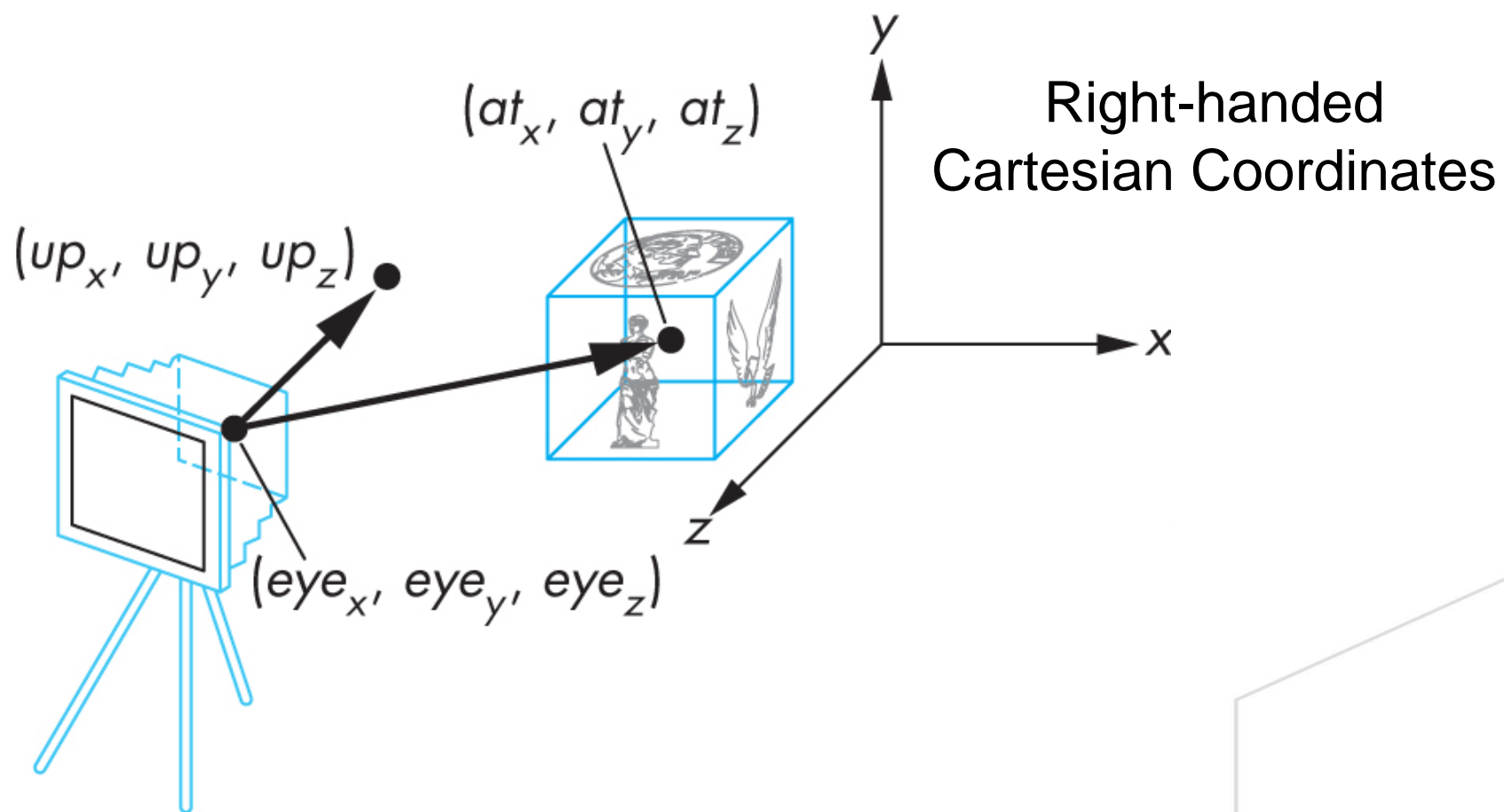
Translate then Rotate

```
glRotatef(45.0f, 0.0f, 0.0f, 1.0f);  
glTranslate(0.0f, 0.0f, -1.0f);  
drawObject();
```

OpenGL中的矩阵

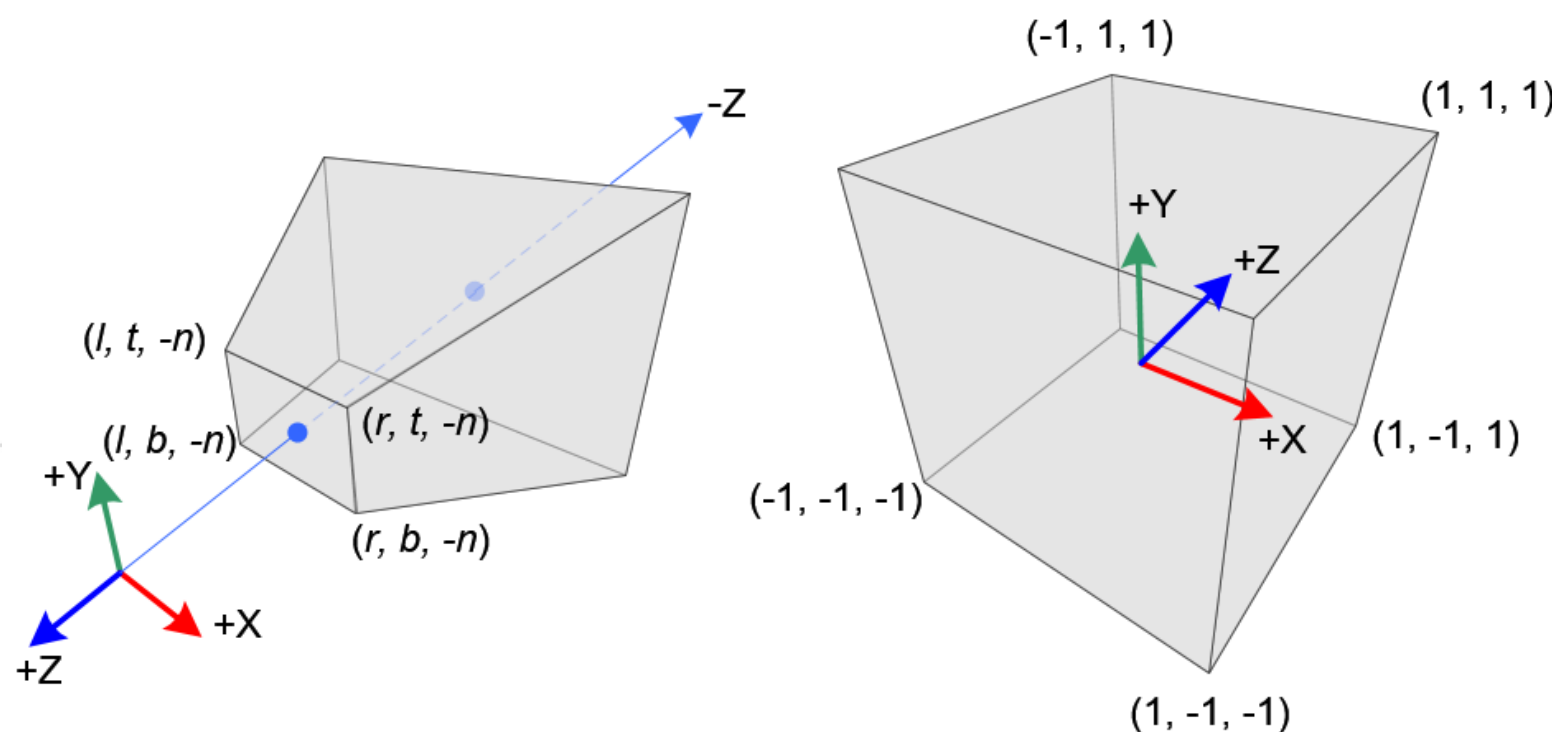
– Viewing transformation (观察变换)

- **gluLookAt** (eyex, eyey, eyez, atx, aty, atz, upx, upy, upz);
- 缺省视角为，摄像头位于原点，视线朝向-z方向，以+y为上



OpenGL中的矩阵

- 投影矩阵 (projection matrix) 定义了view volume
 - 决定物体如何被投影到屏幕上
 - 决定物体如何被裁剪 (哪部分需要被显示)
- 视角 (即摄像头的位置) 就处于view volume的一端



OpenGL中的矩阵

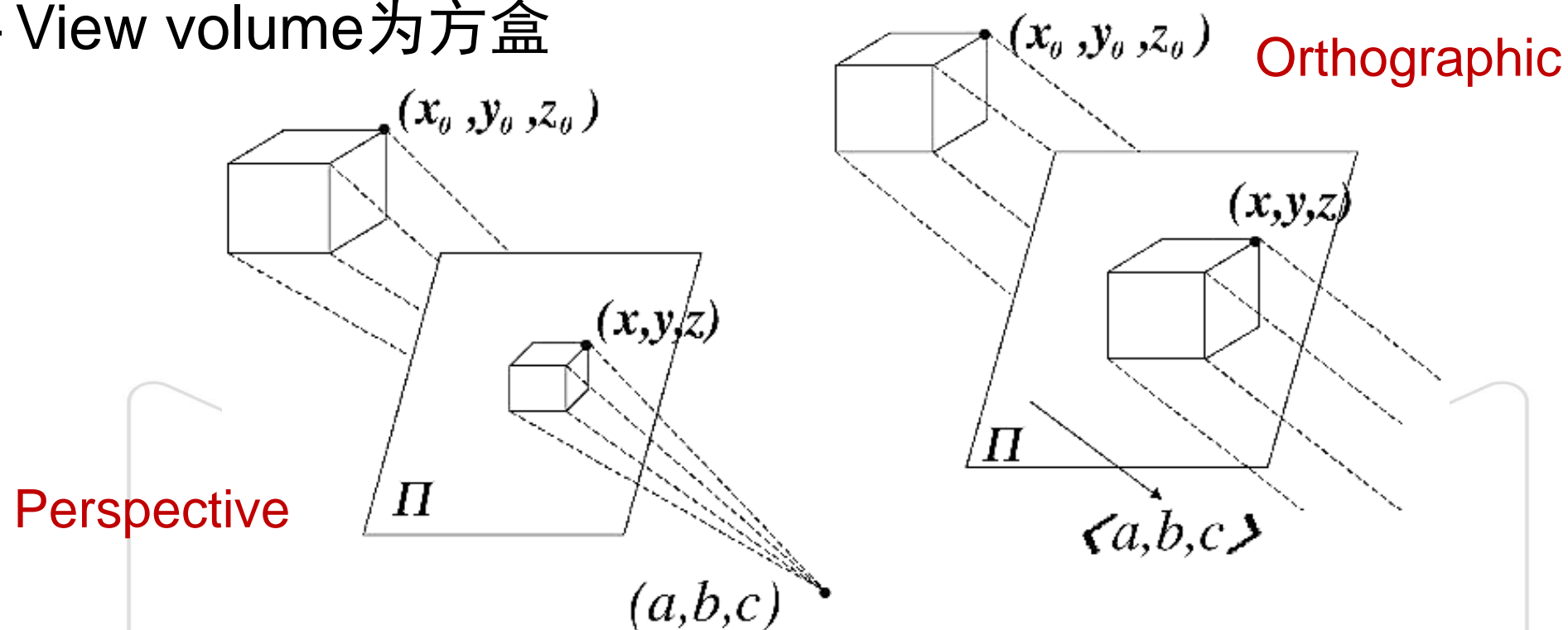
– 投影变换的两种模式

- Perspective

- View volume为截断的金字塔（即视锥，frustum）

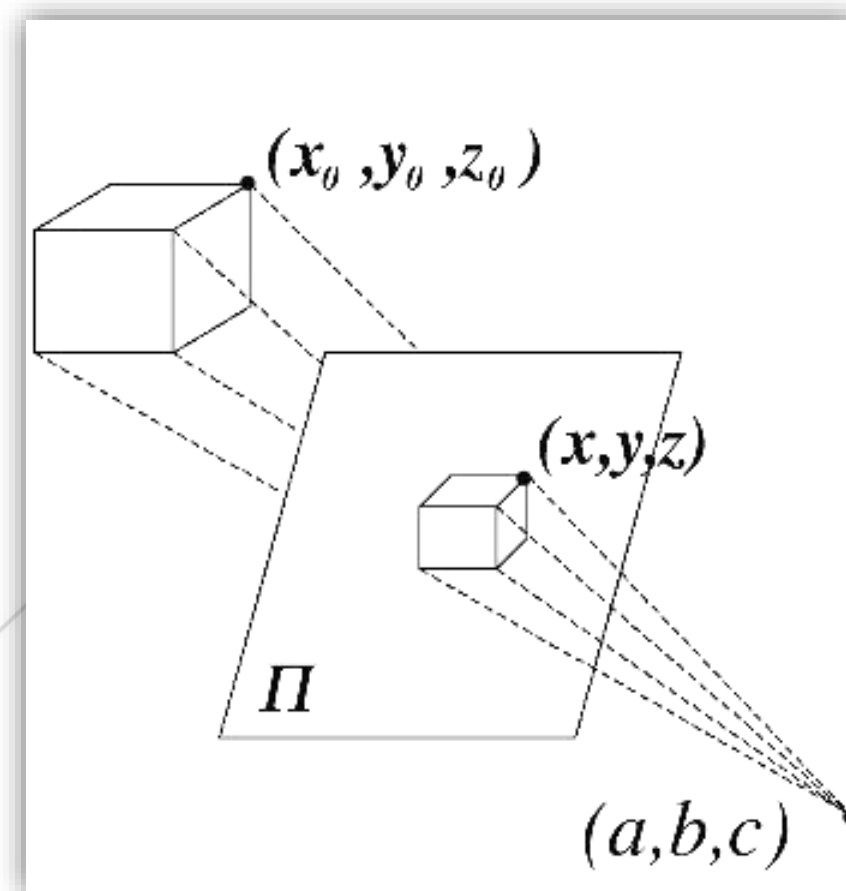
- Orthographic

- View volume为方盒



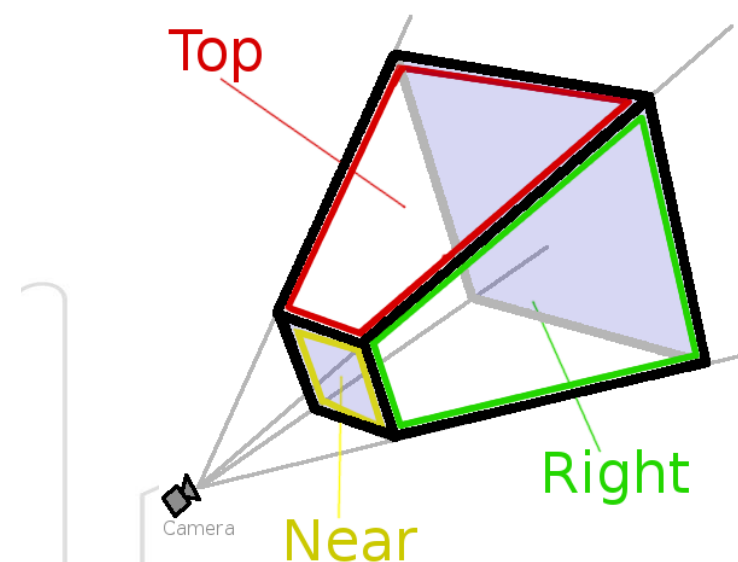
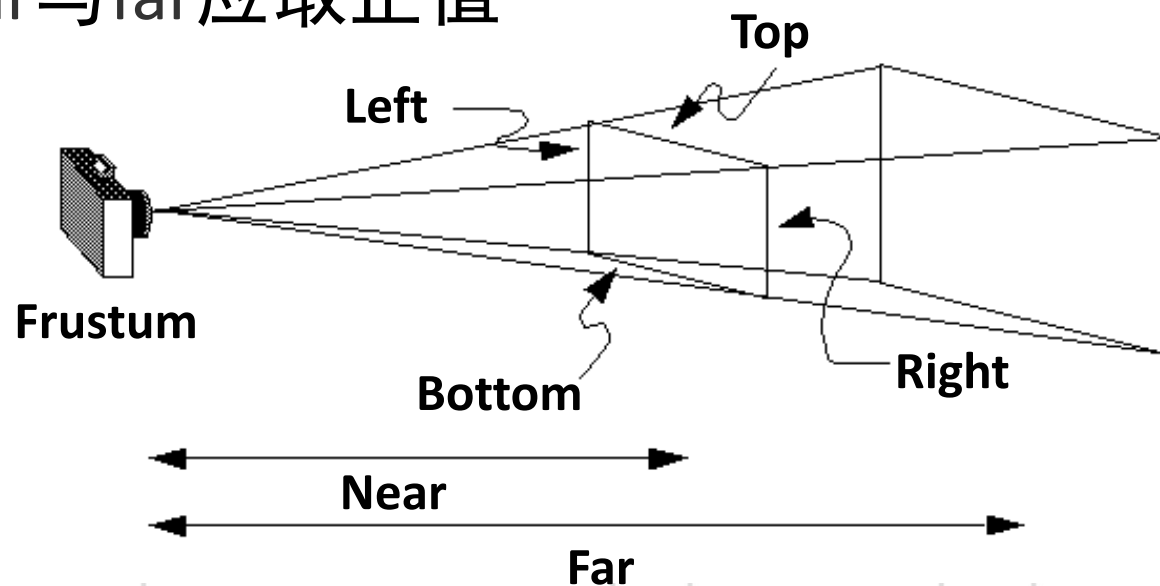
OpenGL中的矩阵

- Perspective projection最为显著的特征为透视搜索（近大远小）
- OpenGL提供指明viewing frustum的多种方式
 - `glFrustum(...)`;
 - `gluPerspective(...)`;



OpenGL中的矩阵

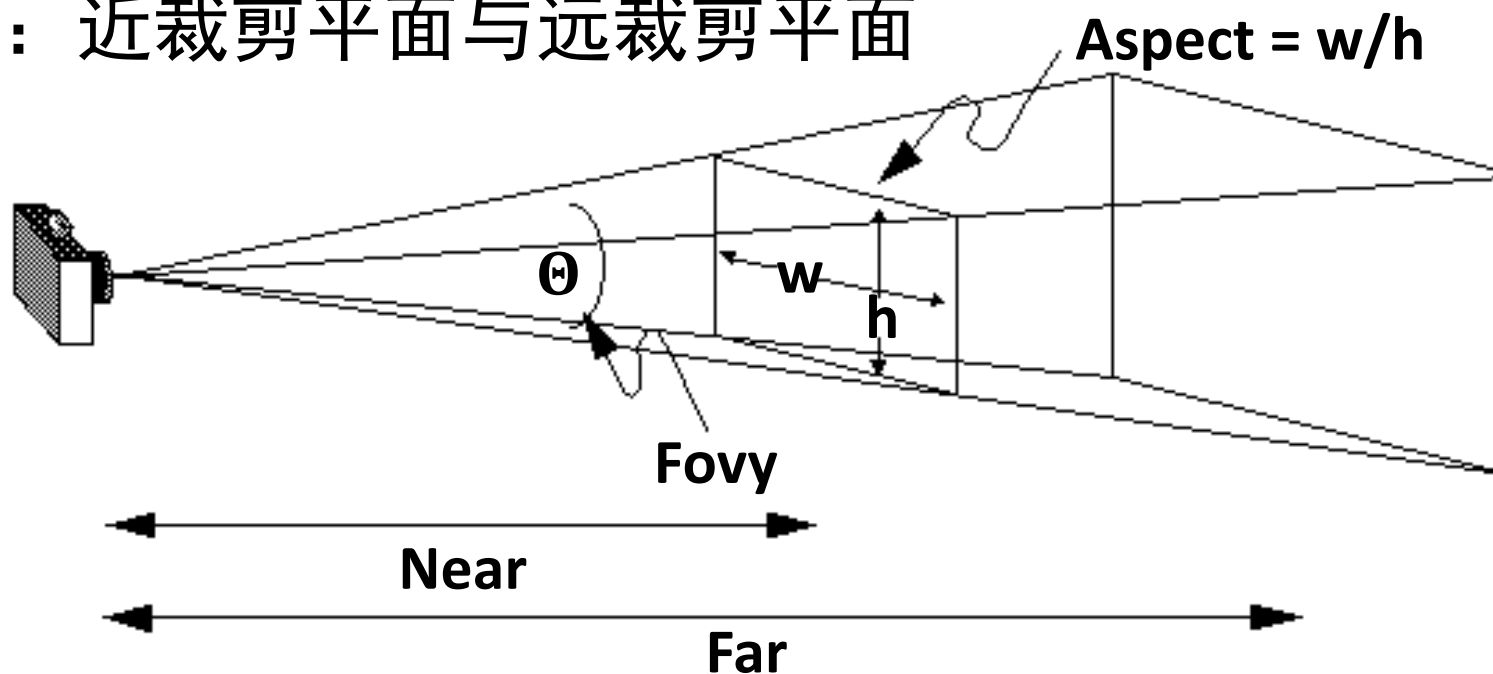
- **glFrustum**(GLdouble left, GLdouble right, GLdouble bottom, GLdouble top, GLdouble near, GLdouble far)
 - left, right, bottom, top指明了近裁剪平面（near）上的边界
 - (left, bottom, -near)与(right, top, -near)分别为近裁剪平面上的左下角与右上角顶点
 - far指明了远裁剪平面
 - near与far应取正值



OpenGL中的矩阵

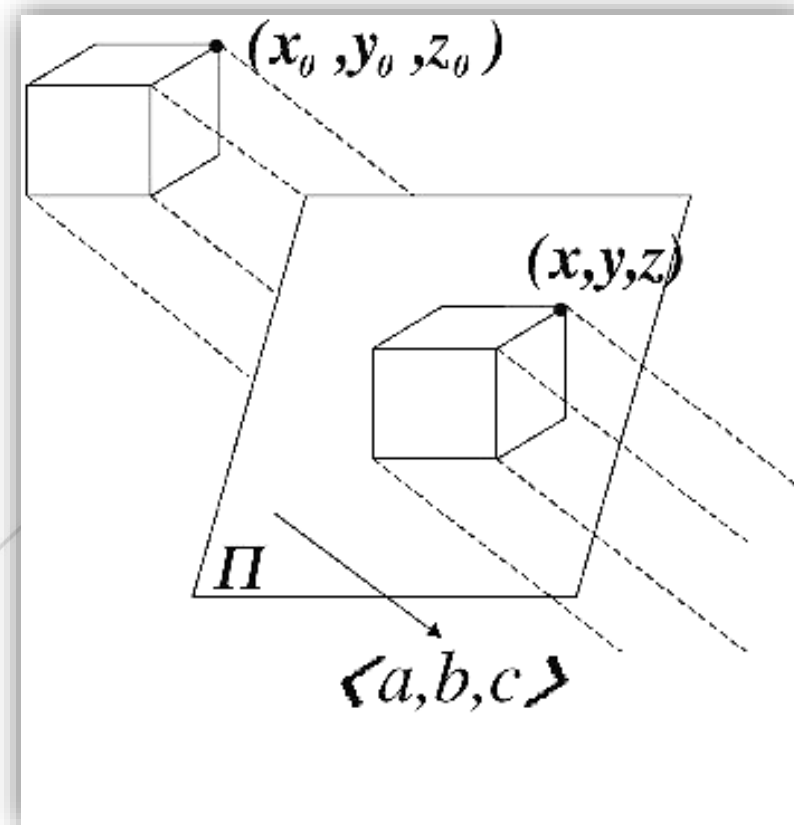
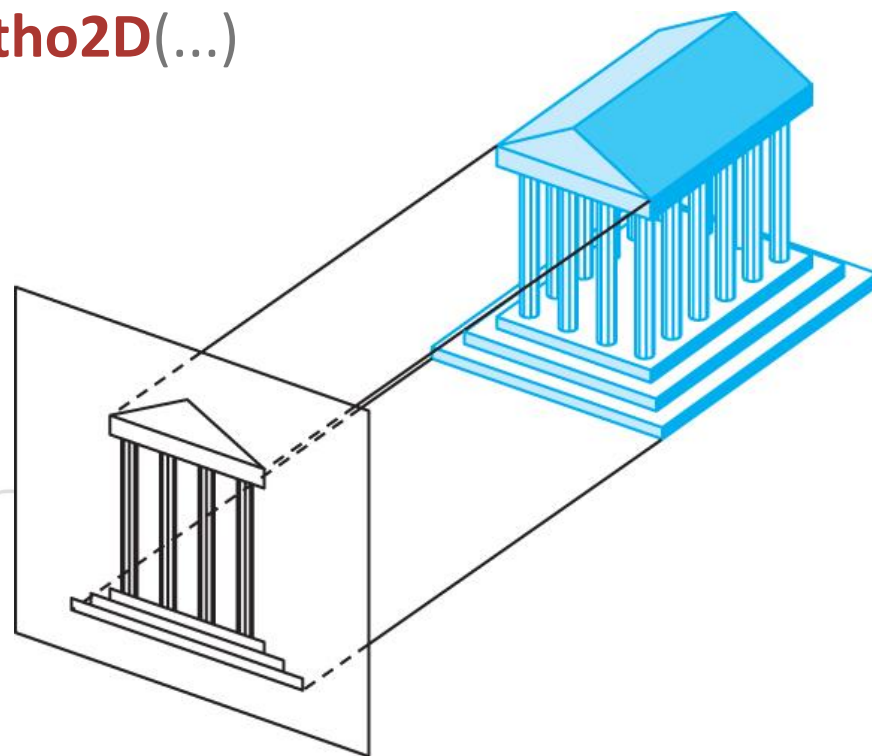
– **gluPerspective**(GLdouble **fovy**, GLdouble **aspect**,
GLdouble **near**, GLdouble **far**)

- 由GLU库提供的更简便的指定frustum的函数
- **fovy**: y方向上的视野 (field of view) 宽度, 单位为角度
- **aspect**: 纵横比 (width/height)
- **near**与**far**: 近裁剪平面与远裁剪平面



OpenGL中的矩阵

- Orthographic projection中不存在透视收缩 (foreshortening)
 - 物体与摄像头之间的距离并不改变其大小
 - 同样有多个定义orthographic projection的函数
 - `glOrtho(...)`
 - `gluOrtho2D(...)`



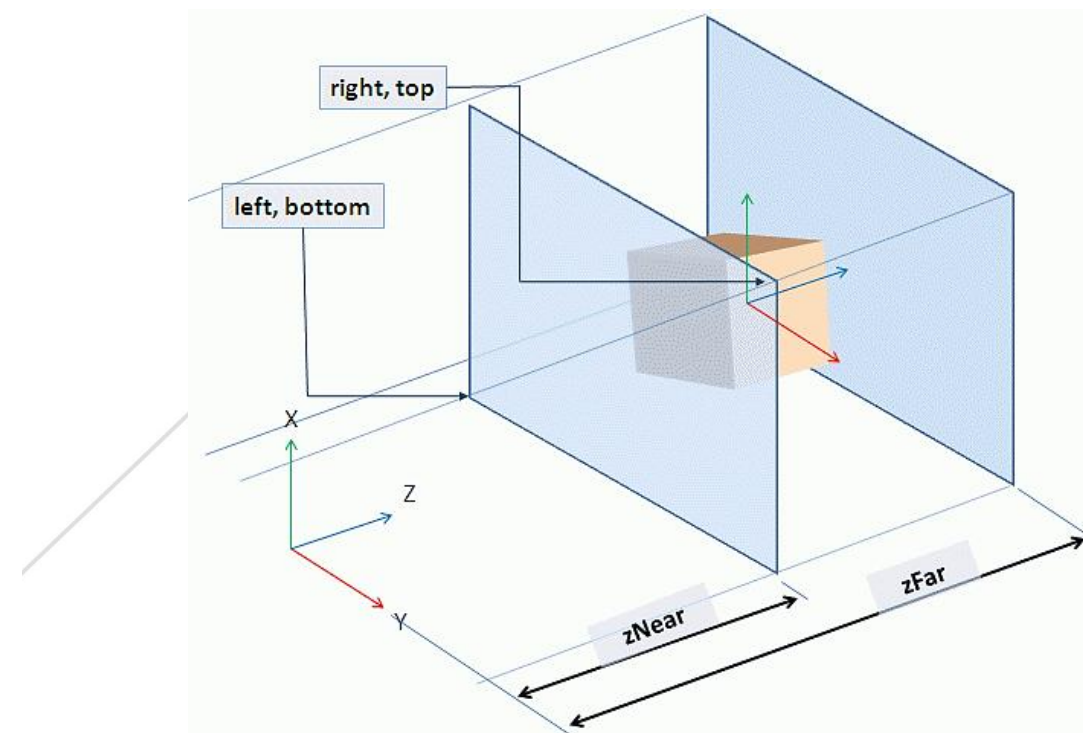
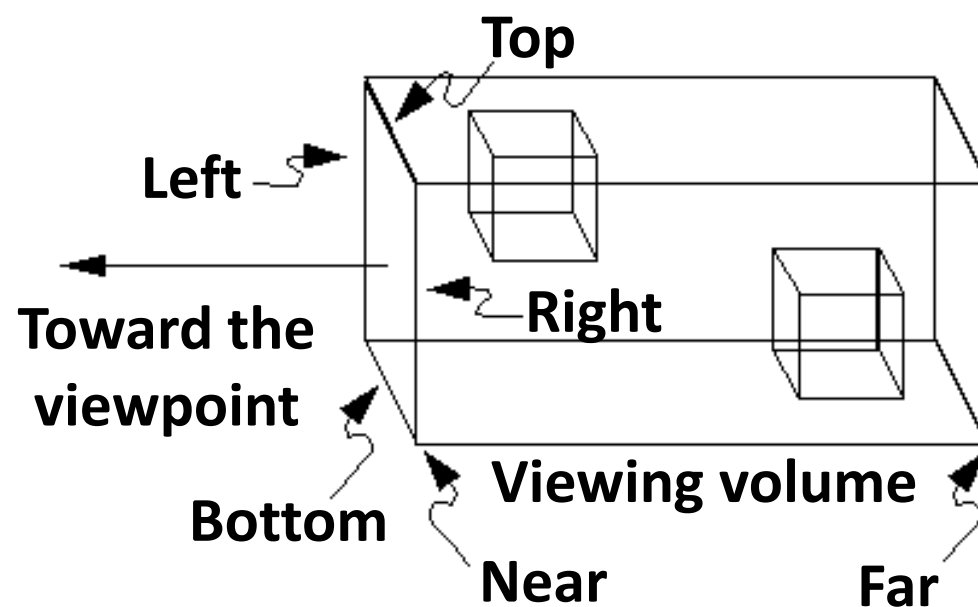
OpenGL中的矩阵

– **glOrtho**(GLdouble left, GLdouble right, GLdouble bottom, GLdouble top, GLdouble near, GLdouble far)

• 参数与**glPerspective()**很相似

• (left, bottom, -near)与(right, top, -far)分别为近裁剪平面上的左下角与右上角顶点

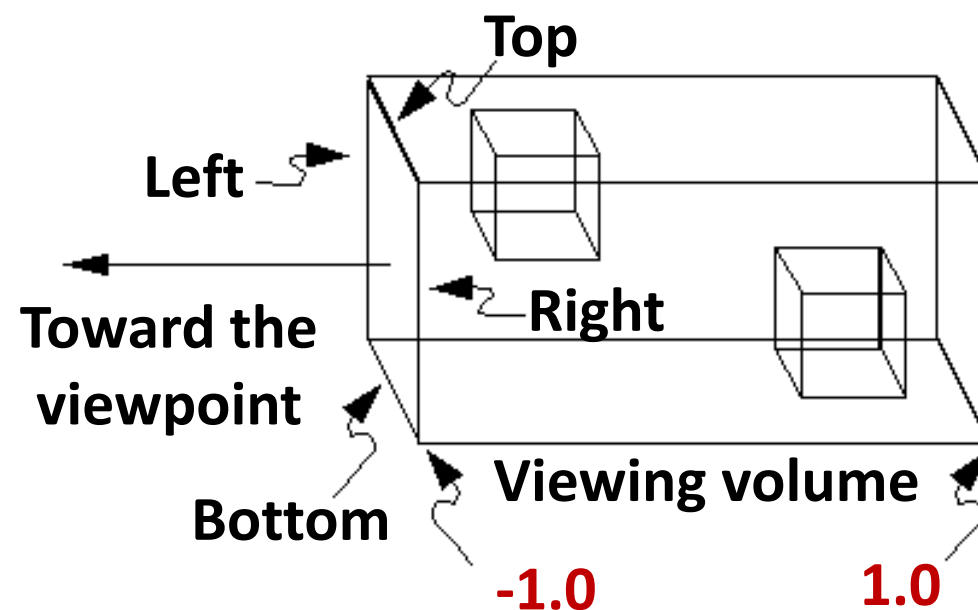
• 可以是任意不相等的两个值



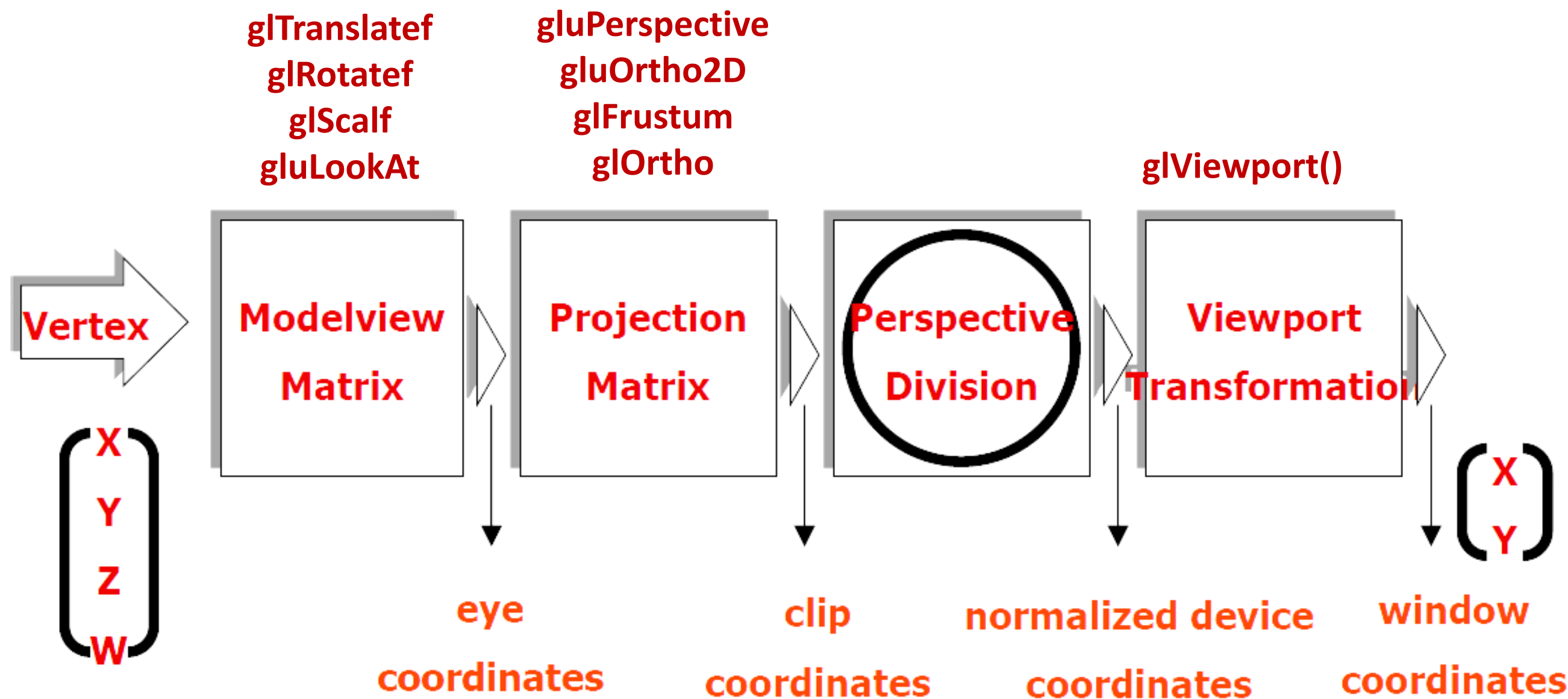
OpenGL中的矩阵

– **gluOrtho2D**(GLdouble left, GLdouble right, GLdouble bottom, GLdouble top)

- 由GLU库提供的更简便的指定frustum的函数
- (left, bottom)与(right, top)分别为近裁区域中左下角与右上角
- 自动定义远近裁剪平面分别为-1.0及1.0
- 二维模式下，frustum与viewport等价



OpenGL中的矩阵



- OpenGL是什么？
 - 功能介绍、发展历程、相关库（GLU, GLUT）
- OpenGL如何工作
 - 简易pipeline（vertex operations→rasterization→frame buffer）
 - OpenGL函数类型及其命名方式
- OpenGL程序结构简介
 - Hello world、GLUT回调函数
- OpenGL基本概念与语句
 - primitive类型
 - 矩阵（matrix stack, modelview, projection）

Questions?