变换

冯结青

浙江大学 CAD&CG国家重点实验室

变换

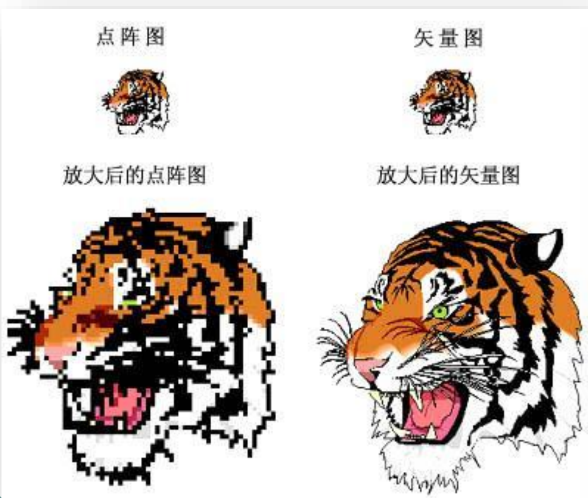
- 二维变换
- 三维变换
  - 场景坐标系和模型变换
  - 视点坐标系和取景变换
  - 投影坐标系和投影变换
  - 屏幕坐标系和设备变换

变换

- 二维变换
- 三维变换
  - 场景坐标系和模型变换
  - 视点坐标系和取景变换
  - 投影坐标系和投影变换
  - 屏幕坐标系和设备变换

二维变换

- 通过二维变换、裁剪和光栅化，将定义在世界坐标系中的二维图形变换到以像素为单位的屏幕坐标系中，实现二维物体的显示
  - 二维图形：矢量图形、卡通动画



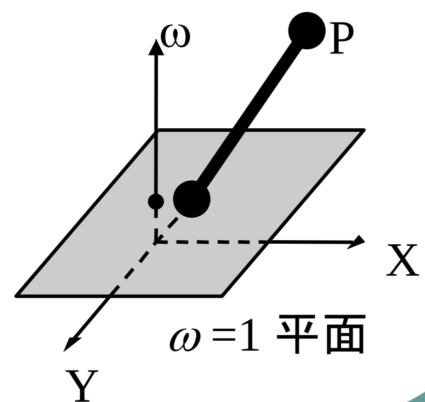
二维变换

- 齐次坐标表示
- 二维图形中常见的变换
  - 基本变换：平移、旋转、放缩
  - 其它变换：剪切、对称、复合

关于齐次坐标

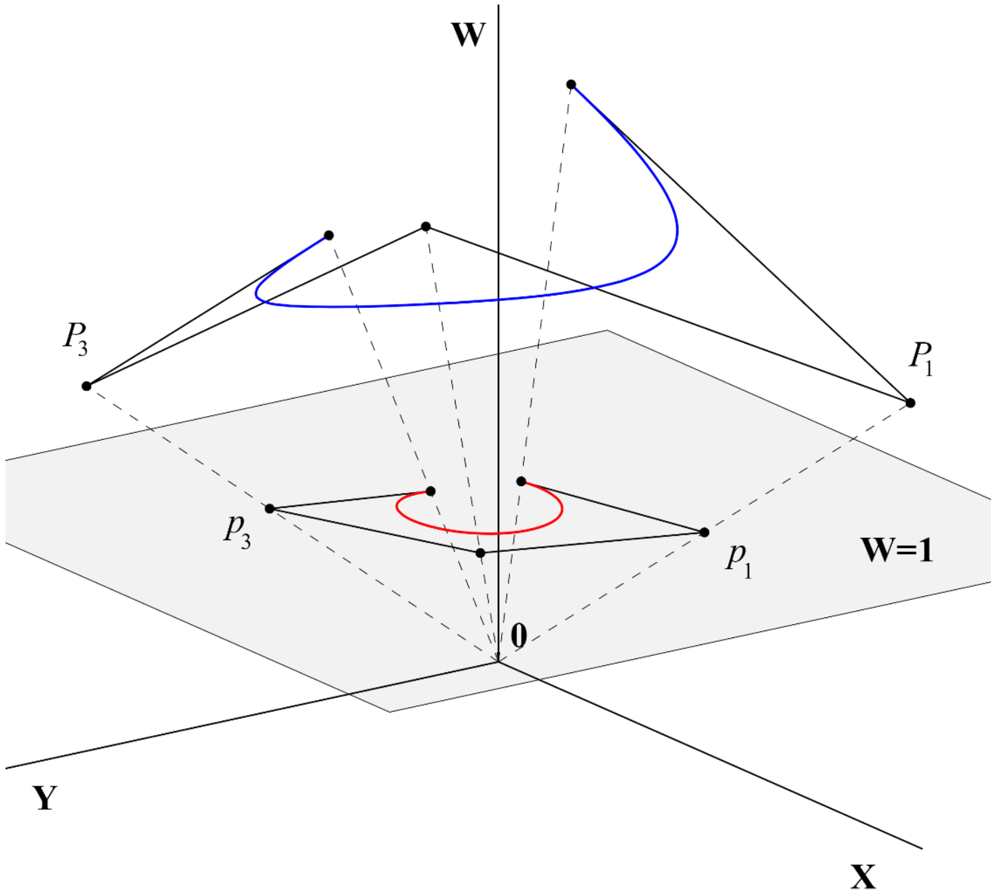
- 用一个$(n+1)$维向量表示一个n维向量
  - 二维点(x,y)，用(X,Y,ω)表示: (2,3)的齐次坐标可以是(4,6,2)、(3,4.5,1.5)
  - ω可以任意选取： $\omega = 0$ 表示无穷远点
- 齐次坐标与普通坐标之间是一一对应关系

$$x = X/\omega \qquad y = Y/\omega$$



- 齐次坐标表示点的优势
  - 表示无穷远点，防止溢出
  - 矩阵变换的统一表示

齐次坐标的例子



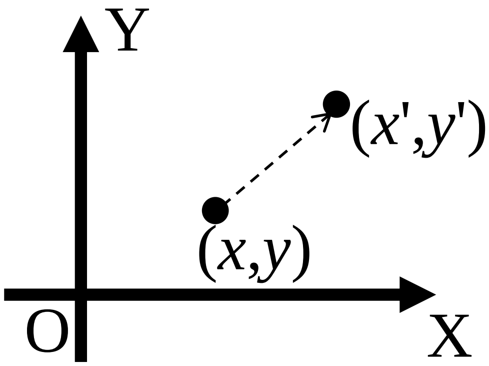
二次有理Bézier曲线：齐次坐标空间(蓝色)、W=1平面上的投影(红色)

二维变换

- 齐次坐标表示
- 二维图形中常见的变换
  - 基本变换：平移、旋转、放缩
  - 其它变换：剪切、对称、复合

二维平移

- 二维点P(x,y)移动(t_x,t_y)后，得到点P'(x', y')



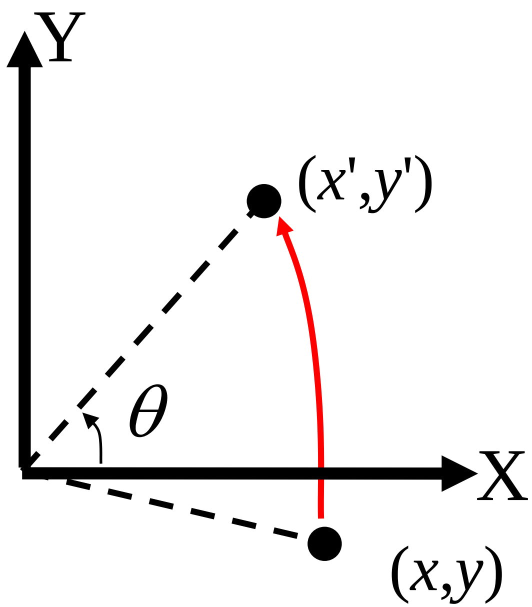
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}$$

采用**齐次坐标**: (x, y) → $(x', y', 1)$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

二维旋转

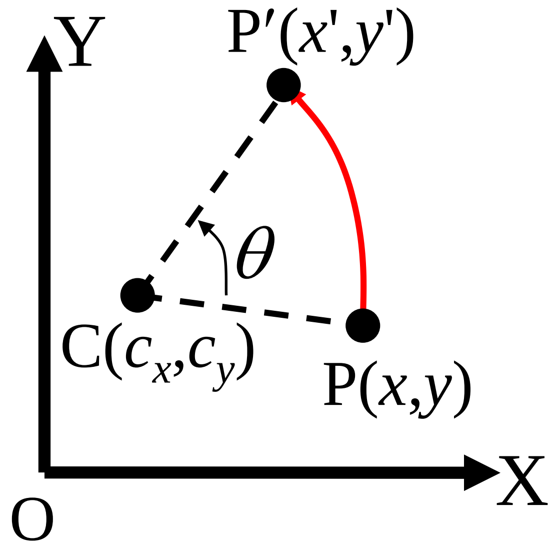
- 将点P(x,y)绕坐标原点按逆时针旋转角θ



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

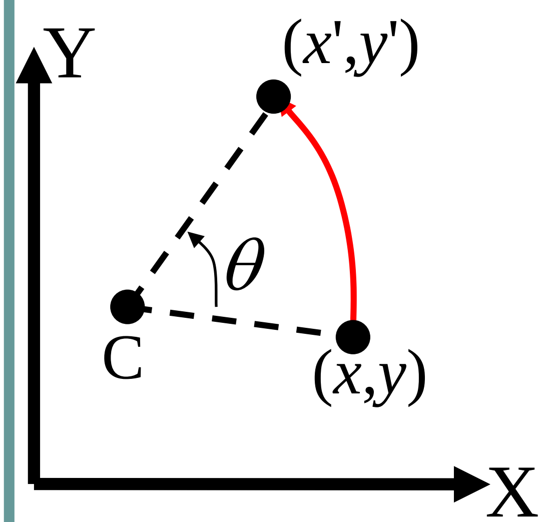
二维旋转

- 将点P(x,y)绕点C(c_x,c_y)按逆时针旋转角θ



二维旋转

- 将点P(x,y)绕点C(c_x,c_y)按逆时针旋转角θ

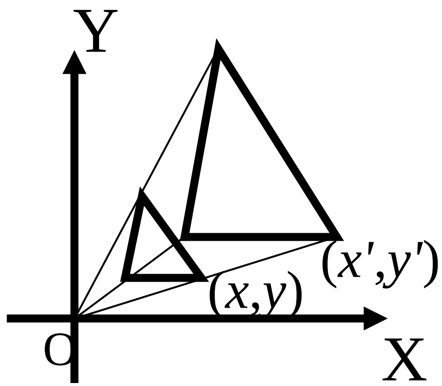


$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & c_x - c_x\cos\theta + c_y\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta & c_y - c_x\sin\theta - c_y\cos\theta \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & c_x \\ 0 & 1 & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & -c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

二维放缩

- 放缩的变换公式



$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

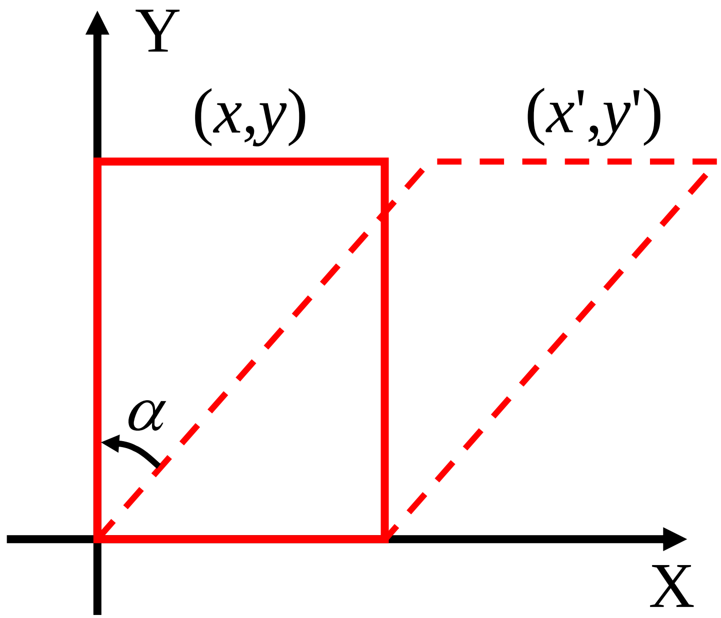
其中s_x和s_y分别为x和y分量的放缩比例

二维变换

- 齐次坐标表示
- 二维图形中常见的变换
  - 基本变换：平移、旋转、放缩
  - 其它变换：剪切、对称、复合

剪切变换(Shear)

- 沿X-轴方向的剪切变换

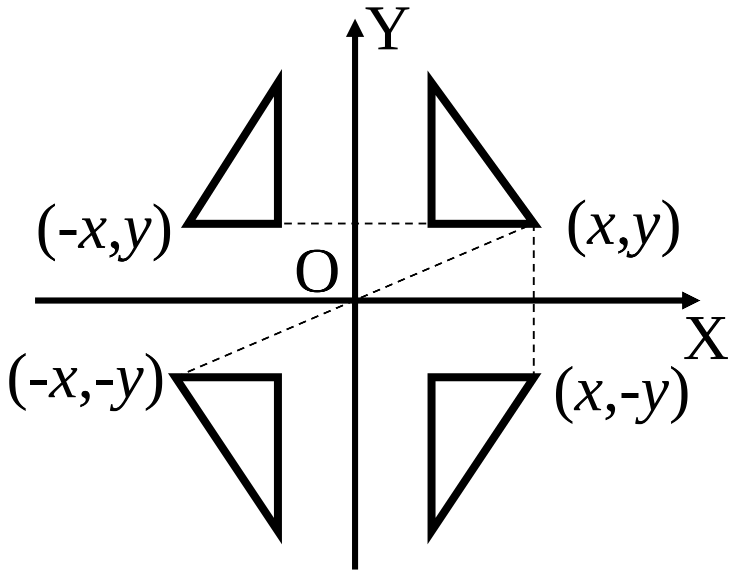


$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & tg\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

(1) 变换过程中, y坐标保持不变,而x坐标值发生线性变化;

(2) 平行于X轴的线段变换后仍平行于X轴，平行于Y轴的线段变换后错切成与Y轴成固定角α的直线

对称变换



$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

关于X轴的对称变换

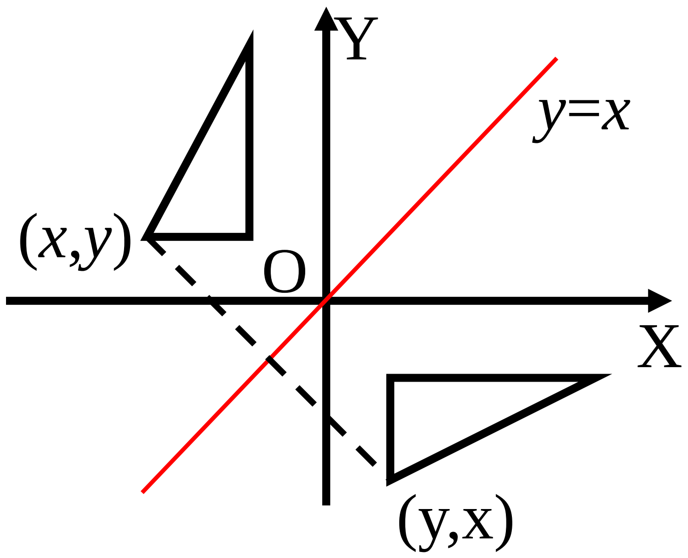
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

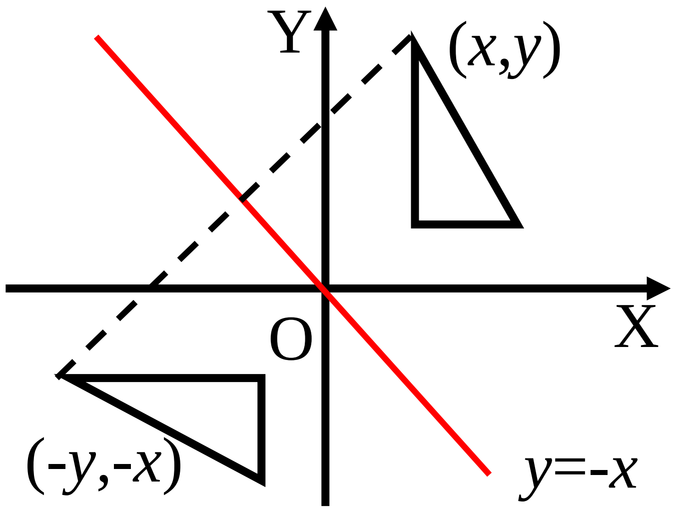
关于坐标原点的对称变换

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

关于Y轴的对称变换

对称变换





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

关于直线$y=x$的对称变换

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

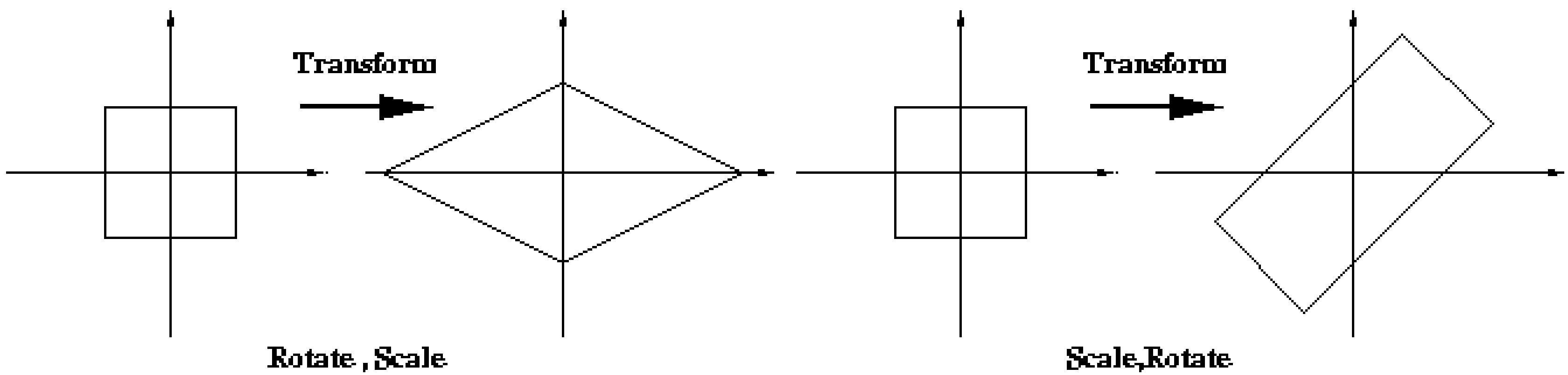
关于直线$y=-x$的对称变换

复合二维变换

- 平移、旋转和放缩矩阵通常记为**T**、**R**和**S**
- 二维变换具有结合性：**(AB)C=A(BC)**
- 二维变换是否具有交换性?

复合二维变换

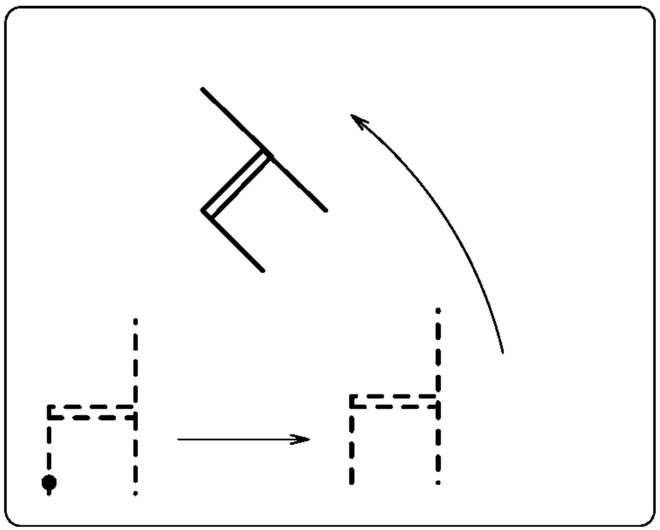
- 二维变换不具有交换性



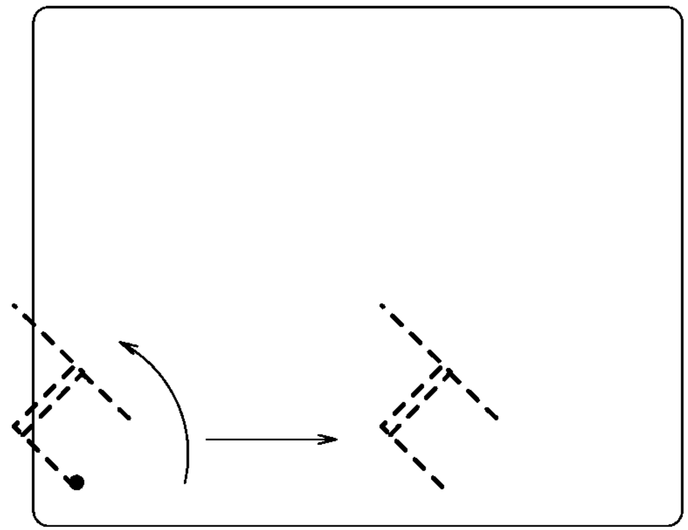
先旋转，再(非等比例)放缩　　　　先(非等比例)放缩，再旋转

复合二维变换

- 二维变换不具有交换性



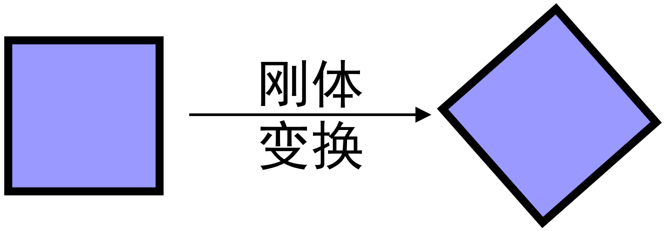
先平移，再旋转



先旋转，再平移

复合二维变换

- 上述变换的组合可以得到特殊的二维变换
  - 刚体变换：
    - 物体的形状没有变化，位置和方向有变化
    - 可以分解为：平移和旋转的组合



    - As rigid as possible shape deformation, surface flatten, shape interpolation ……

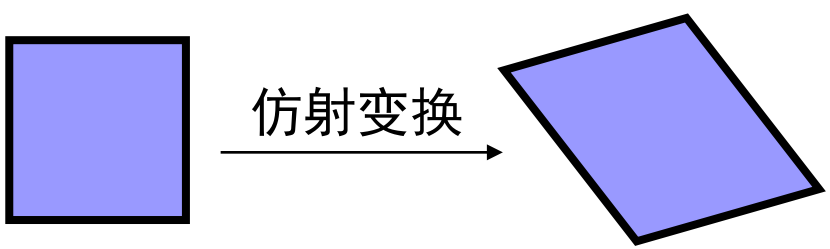
复合二维变换

- 上述变换的组合可以得到特殊的二维变换
  - 仿射变换(affine transformation)
    - affinis， “和...相关”
    - 由一个线性变换加上一个平移组成。可以由一个矩阵A和一个向量**b**给出

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} A & \mathbf{b} \\ 0,\ldots,0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ 1 \end{pmatrix}$$

仿射变换的性质

- 保持二维图形的“平直性”(straightness)和“平行性”(parallelness)
- 共线性(colinearity)
- 保持直线上距离的比率(Ratios of distances along a line)：$|\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2| \,/\, |\mathbf{P}_2\mathbf{P}_3|$
- 可以分解为：平移、旋转和放缩等的组合

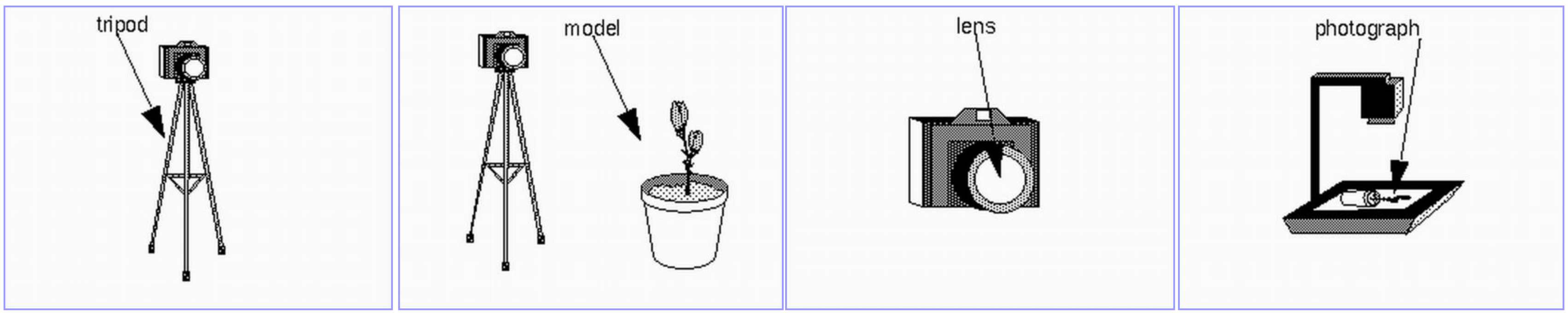


变换

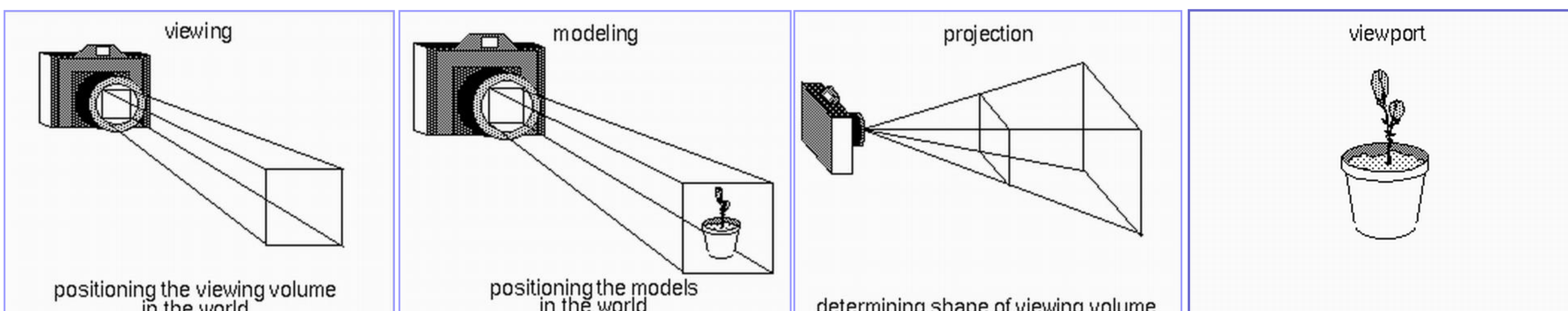
- 二维变换
- 三维变换
  - 场景坐标系和模型变换
  - 视点坐标系和取景变换
  - 投影坐标系和投影变换
  - 屏幕坐标系和设备变换

三维变换的基本概念

- 三维变换可以看作照相过程模拟，即如何将场景中的三维几何物体变换到二维屏幕上



真实的照相机



三维变换的基本概念

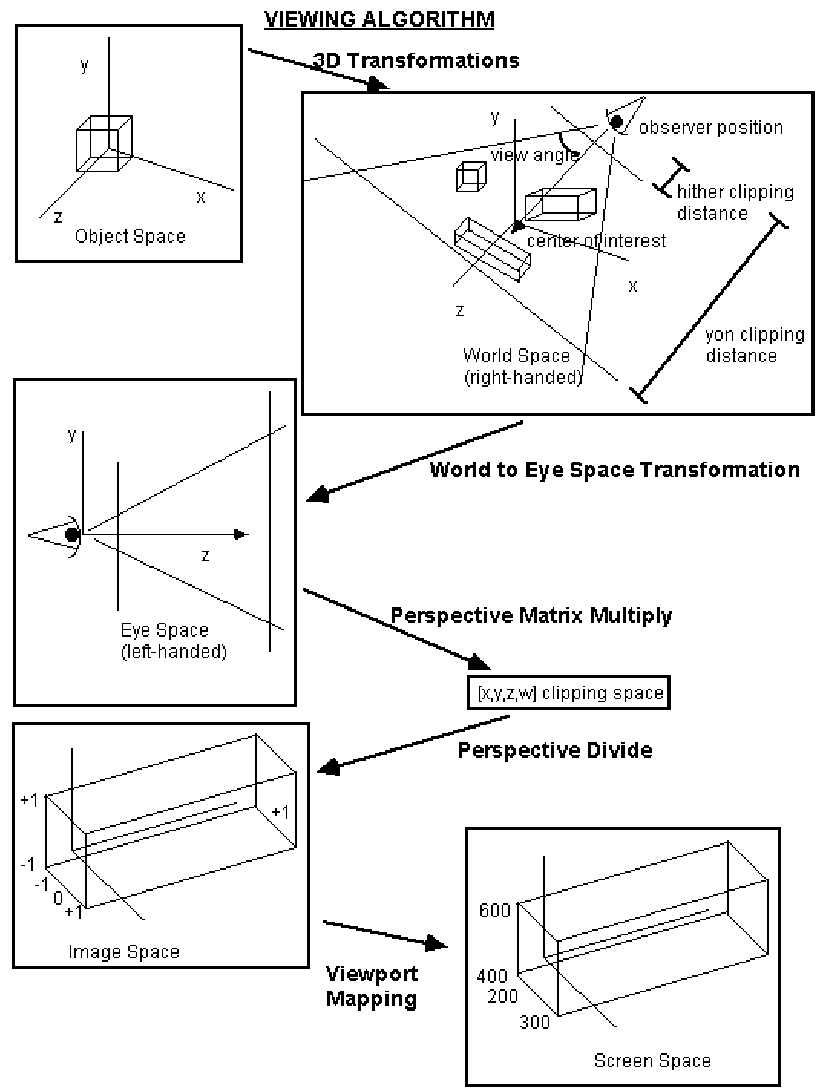
- 场景造型：
  - 场景坐标系：世界坐标系、局部坐标系
  - 变换：模型变换
- 放置虚拟照相机
  - 坐标系：视点坐标系(虚拟照相机的位置、朝向以及向上的方向)
  - 变换：取景变换 (在视域四棱锥进行裁剪和背面剔除)

三维变换的基本概念

- 投影(照相、摄影):
  - 坐标系：投影坐标系和窗口坐标系
  - 变换：投影变换
- 二维显示
  - 坐标系：窗口坐标系、规格化设备坐标系与屏幕的物理坐标系
  - 变换：设备变换、视窗变换

三维变换流程图

局部坐标 → 模型变换 → 世界坐标 → 取景变换 → 视点坐标 → 投影变换 → 投影坐标 → 设备变换 → 设备坐标 → 视窗变换 → 屏幕坐标

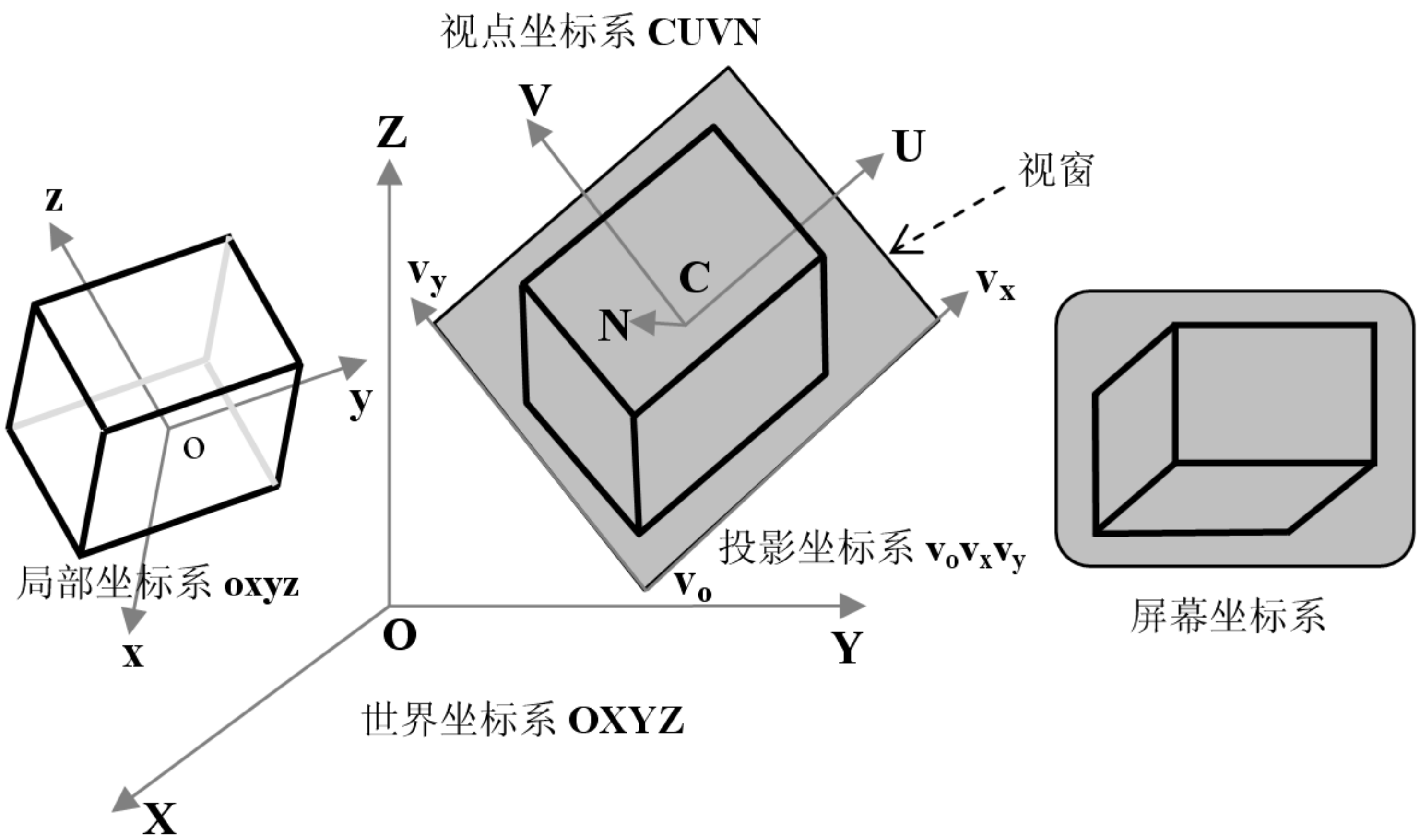


三维变换的流程图

变换

- 二维变换
- 三维变换
  - 场景坐标系和模型变换
  - 视点坐标系和取景变换
  - 投影坐标系和投影变换
  - 屏幕坐标系和设备变换

三维变换中的各种坐标系

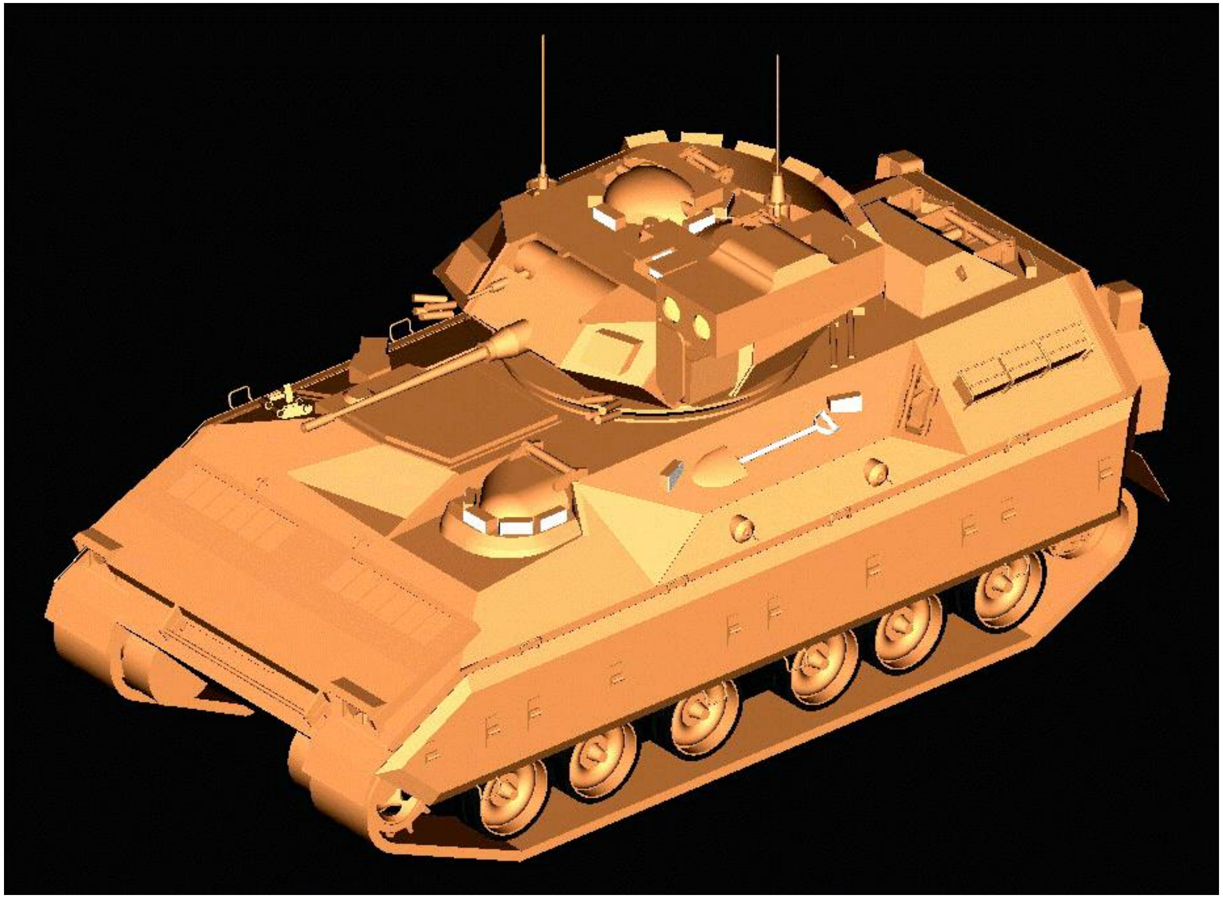


三维变换中的各种坐标系

场景坐标系和模型变换

- 几何场景建立于世界坐标系中
- 场景中的具体物体与局部坐标系相联系
  - 局部坐标系可以简化物体的定义
  - 物体=｛标准体素，变换｝
- 模型变换：
  - 物体从局部坐标系到世界坐标系的变换
  - 三维线性和非线性变换

CSG模型



Bradley Fighting Vehicle模型由8600个基本体素构成

三维模型变换：平移

- 三维平移T：三维点P(x,y,z)移动(t_x,t_y,t_z)后，得到点P'(x',y',z')

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

三维模型变换：放缩

- 三维放缩S：三维点P(x,y,z)放缩(s_x,s_y,s_z)后，得到点P' (x',y',z')

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

三维模型变换：旋转

- 绕x轴逆时针旋转θ角的旋转变换R_x

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

- 绕y轴逆时针旋转θ角的旋转变换R_y

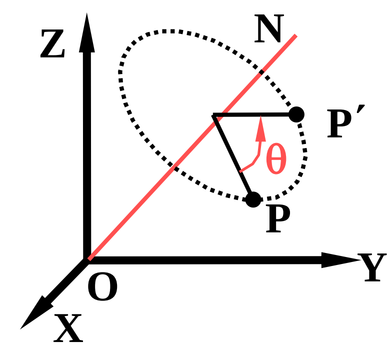
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

- 绕z轴逆时针旋转θ角的旋转变换R_z

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

绕过坐标原点的任意倾斜直线旋转θ

- 设旋转轴ON为过原点的任一直线，它相对于坐标轴的方向余弦分别为



$$n_1 = \cos\alpha \quad n_2 = \cos\beta \quad n_3 = \cos\gamma$$

  - α、β、γ称为欧拉角
  - 解决方法
    - 变换坐标系OXYZ，使得新坐标系的Z轴与ON重合，得到OX′Y′Z′，记变换为A
    - 将物体沿OZ′旋转θ
    - 将旋转后的物体做逆变换A^{-1}

绕过坐标原点的任意倾斜直线旋转θ

1.假设在Z轴上取单位矢量K，使K绕Y轴旋转θ_1角，再绕Z轴旋转θ_2角，使其与ON轴重合。

$$\begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$=[\sin\theta_1\cos\theta_2 \quad \sin\theta_1\sin\theta_2 \quad \cos\theta_1 \quad 1]^T$$

$n_1=\cos\alpha=\sin\theta_1\cos\theta_2$ $\quad n_2=\cos\beta=\sin\theta_1\sin\theta_2$ $\quad n_3=\cos\gamma=\cos\theta_1$

2.将物体沿变换后的Z轴，即ON轴旋转θ

3. 做上述1.的逆变换：绕Z轴旋转-θ_2角，绕Y轴旋转-θ_1角

其变换矩阵为：

$$T=\underset{\text{绕}Y\text{轴旋转角}-\theta_1}{\begin{bmatrix}\cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}}\underset{\text{绕}Z\text{轴旋转角}-\theta_2}{\begin{bmatrix}\cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 & 0\\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}}\underset{\text{绕}Z\text{轴旋转角}\theta}{\begin{bmatrix}\cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0\\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}}$$

$$\underset{\text{绕}Z\text{轴旋转角}\theta_2}{\begin{bmatrix}\cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0\\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}}\underset{\text{绕}Y\text{轴旋转角}\theta_1}{\begin{bmatrix}\cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ -\sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}}$$

$$T=\begin{bmatrix}n_1^2+(1-n_1^2)\cos\theta & n_1n_2(1-\cos\theta)+n_3\sin\theta & n_1n_3(1-\cos\theta)-n_2\sin\theta & 0\\ n_1n_2(1-\cos\theta)-n_3\sin\theta & n_2^2(1-n_2^2)\cos\theta & n_2n_3(1-\cos\theta)+n_1\sin\theta & 0\\ n_1n_3(1-\cos\theta)+n_2\sin\theta & n_2n_3(1-\cos\theta)-n_1\sin\theta & n_3^2+(1-n_3^2)\cos\theta & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

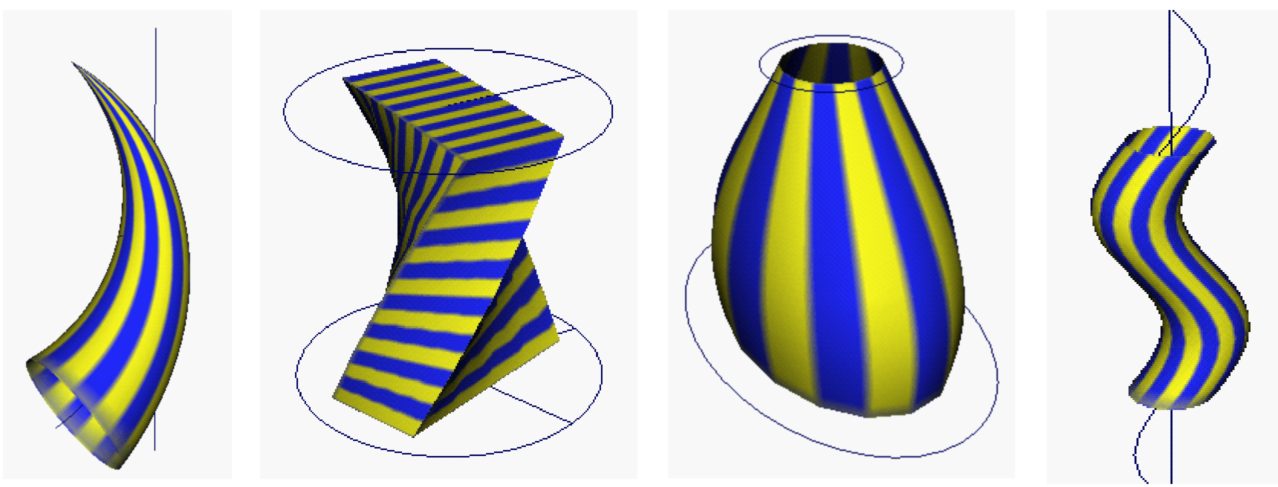
三维模型变换

- 各种对称变换：关于坐标原点、坐标轴、坐标平面、特殊平面$x\pm y\pm z=0$为对称点、面的变换 (课后练习)
- 刚体变换：平移与旋转的复合
- 仿射变换：保持共线、共面性、平行性
- 剪切变换：沿X、Y、Z方向的剪切？(课后练习)

三维模型变换(课后阅读)

- 非线性三维模型变换：变换矩阵是空间位置(x,y,z)或者旋转角度$\theta(x,y,z)$的函数

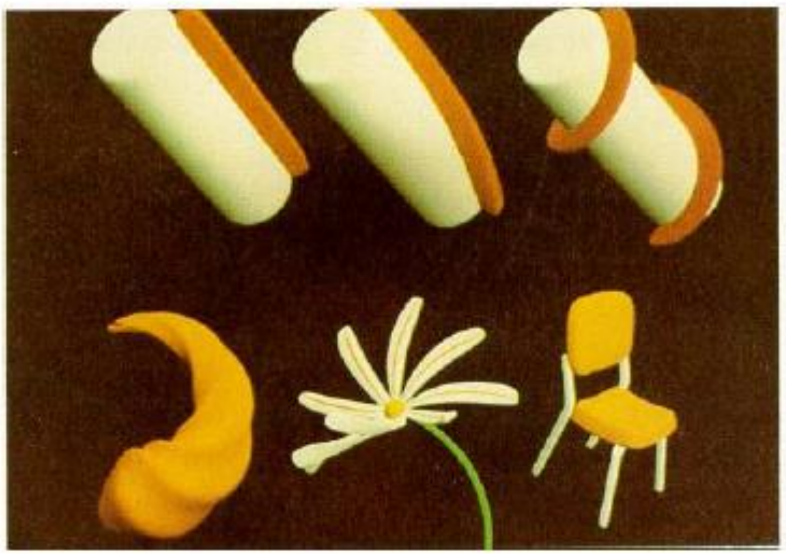
A. Barr, Global and local deformations of solid primitives, Siggraph84



三维变形

- Deformations are important and highly intuitive operations which ease the control and rendering of large families of three dimensional geometric shapes.

  \- Alan Barr 1984



Bending

Twisting

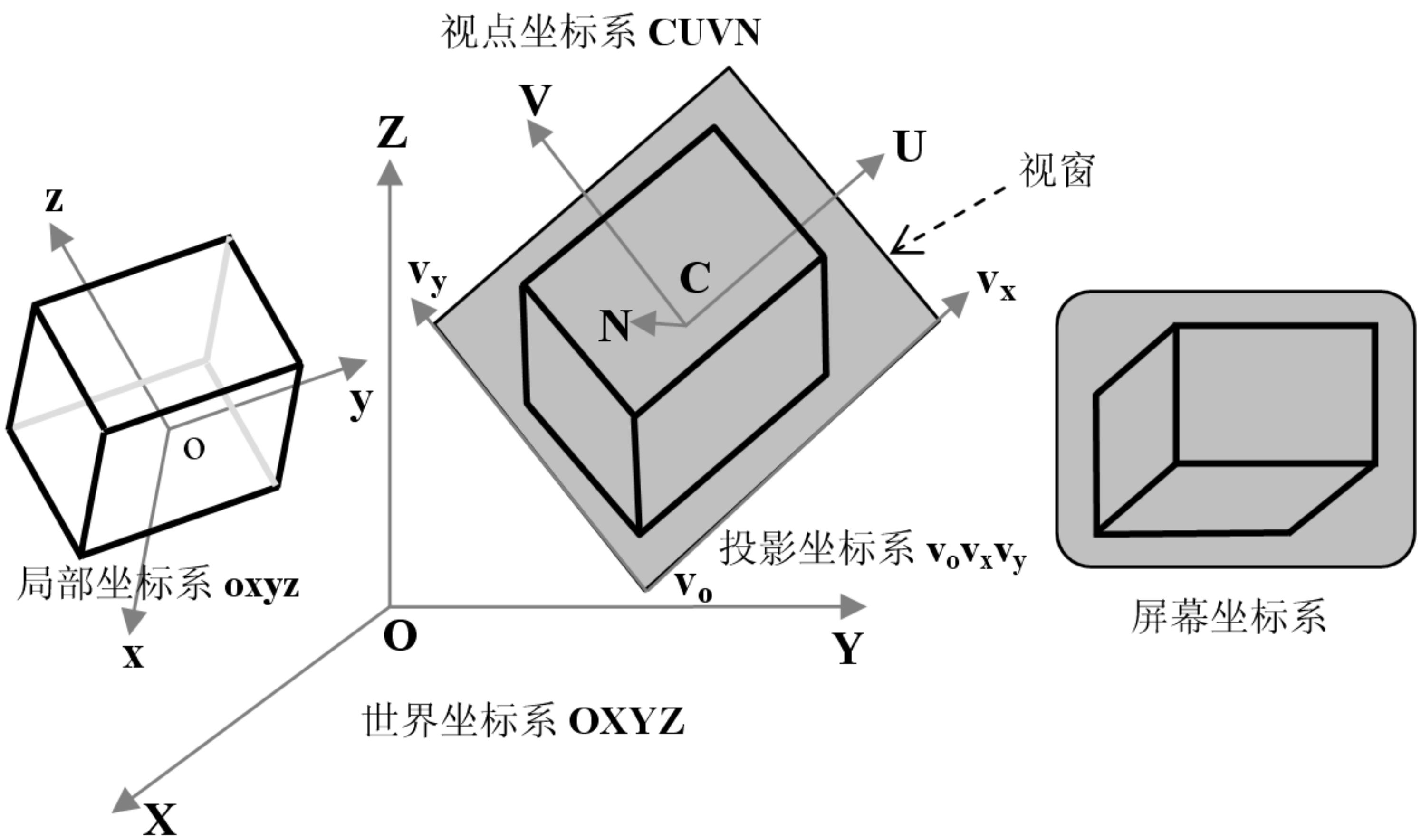
Tapering

…

变换

- 二维变换
- 三维变换
  - 场景坐标系和模型变换
  - 视点坐标系和取景变换
  - 投影坐标系和投影变换
  - 屏幕坐标系和设备变换

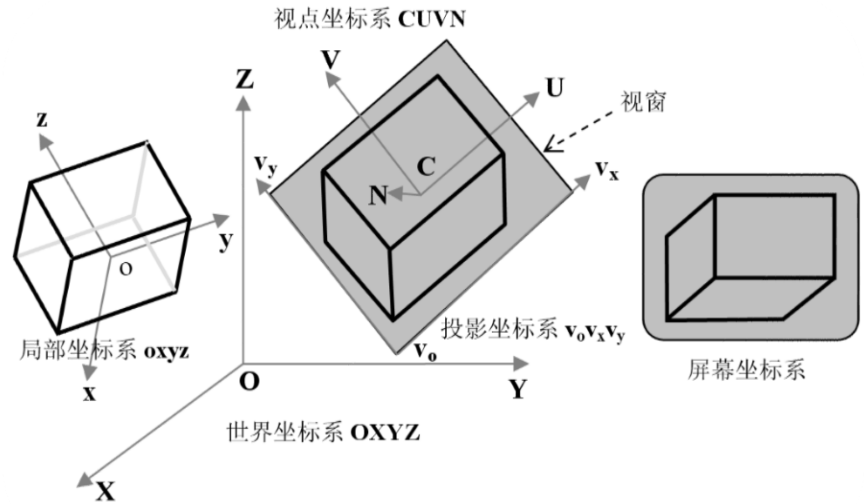
三维变换中的各种坐标系



三维变换中的各种坐标系

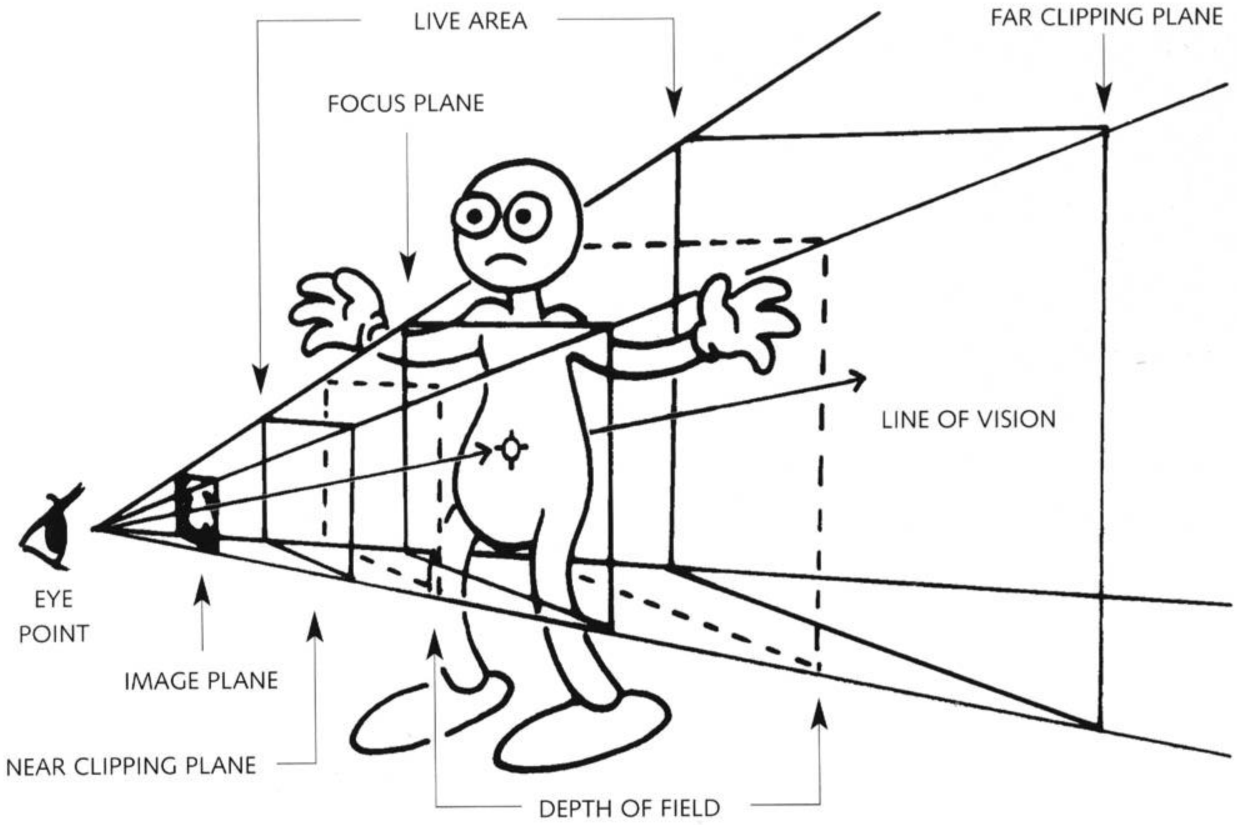
视点坐标系和取景变换

- 视点坐标系
  - 视点坐标系定义于世界坐标系中；
  - 其过程类似于拍照片：
    - 照相机镜头的朝向：视线方向
    - 照相机的位置
    - UP方向



三维变换中的各种坐标系

相机模型


LIVE AREA
FAR CLIPPING PLANE
FOCUS PLANE
LINE OF VISION
EYE
POINT
IMAGE PLANE
NEAR CLIPPING PLANE
DEPTH OF FIELD

视点坐标系的交互建立

- 坐标原点**C**=(C_x,C_y,C_z)：相机的位置
- 单位向量**N**=(N_x,N_y,N_z)：镜头的朝向
- 与N不平行的向量**UP**：

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{N} \times \mathbf{UP}}{\|\mathbf{N} \times \mathbf{UP}\|} \qquad \mathbf{U} = \mathbf{V} \times \mathbf{N}$$

得到两个向量 **U**=(U_x,U_y,U_z) 和**V**=(V_x,V_y,V_z)，然后单位化。

视点坐标系的交互建立

- 四个矢量C、U、V、N组成了视点坐标系
- 由世界坐标系到视点坐标系的取景变换：

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ n \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_x & U_y & U_z & 0 \\ V_x & V_y & V_z & 0 \\ N_x & N_y & N_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -C_x \\ 0 & 1 & 0 & -C_y \\ 0 & 0 & 1 & -C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

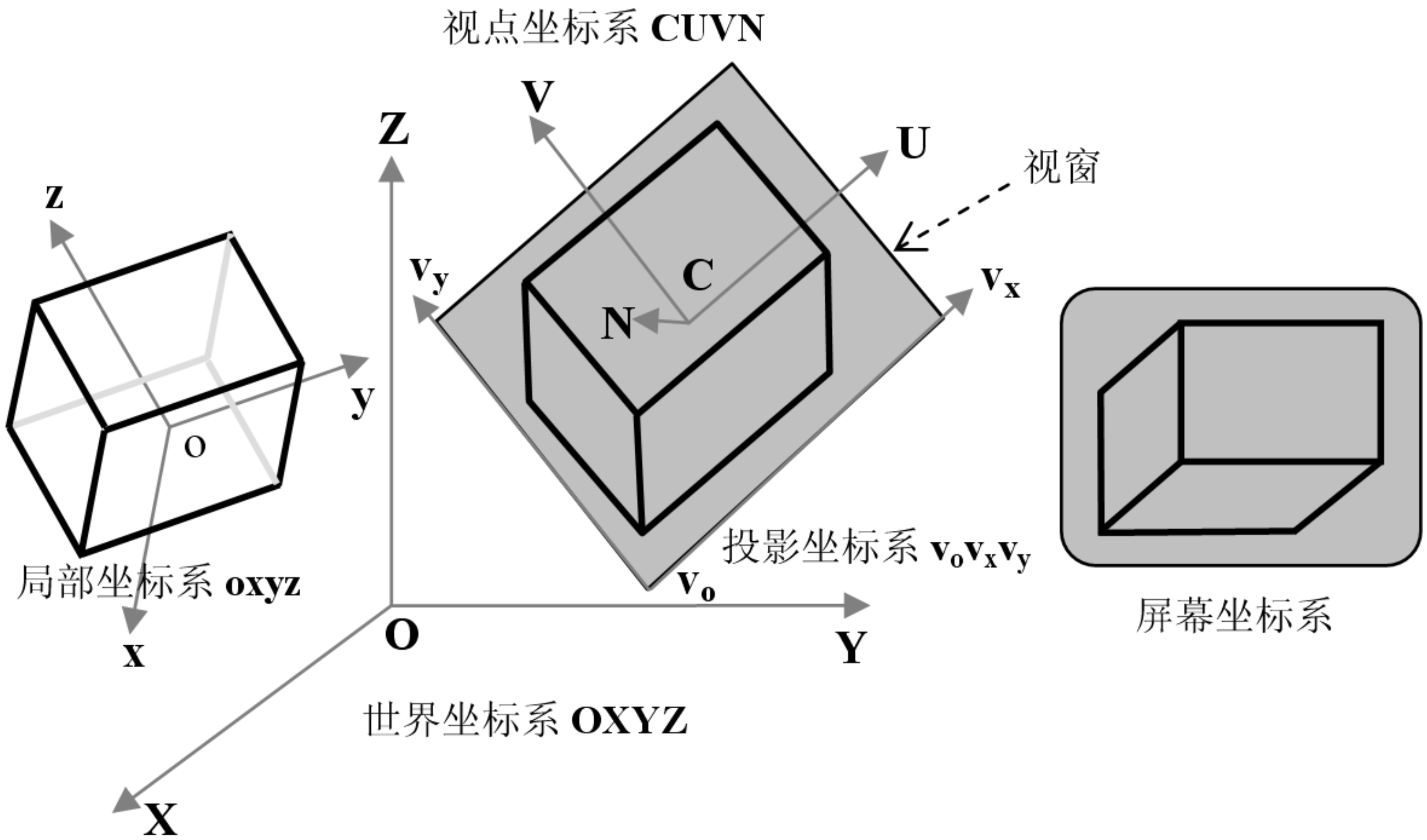
(x,y,z)为世界坐标系中的点

(u,v,n)为视点坐标系中的点

变换

- 二维变换
- 三维变换
  - 场景坐标系和模型变换
  - 视点坐标系和取景变换
  - 投影坐标系和投影变换
  - 屏幕坐标系和设备变换

三维变换中的各种坐标系

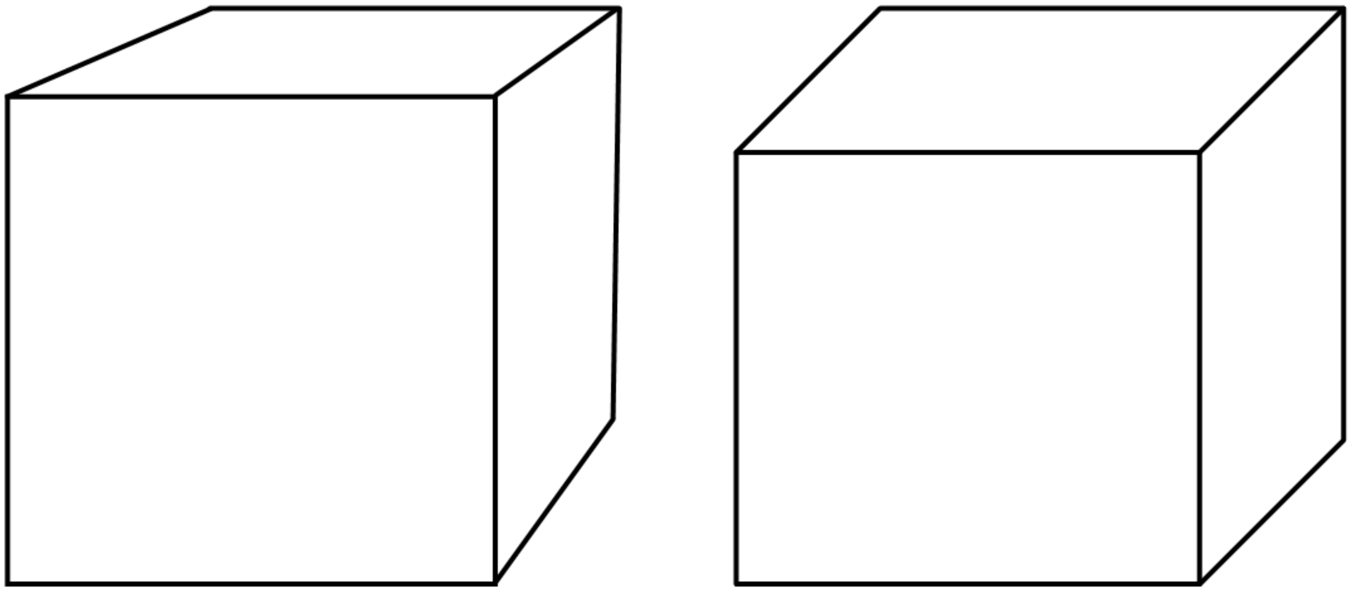


三维变换中的各种坐标系

投影坐标系和投影变换

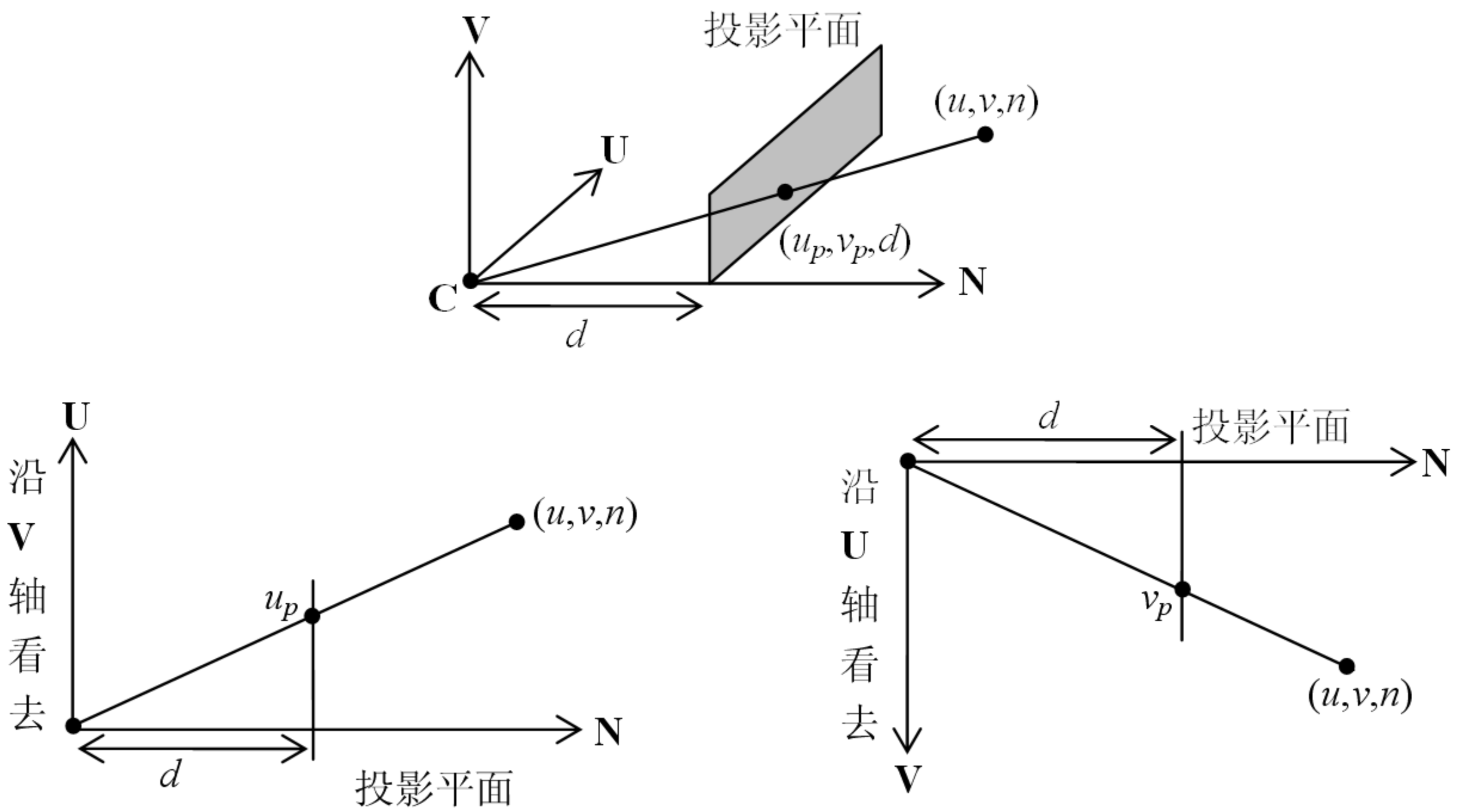
- 投影变换：三维→二维
  - 投影变换是在视点坐标系CUVN中进行的
  - 透视投影：符合人类的视觉特点，产生的投影效果更为真实
  - 平行投影：物体的相对度量保持不变(例如两个等长线段的投影结果仍然是等长的)，适用于建筑和机械设计

透视投影和平行投影



(a) 透视投影　　(b) 平行投影

透视投影



透视投影示意图

透视投影

- 投影点：通常取视点坐标系中(0,0,0)点
- 投影平面：取作与视线方向(**N**方向)垂直的平面$\boldsymbol{n} = d$。假设在视点坐标系中的点为(u,v,n)，那么在投影面上的对应点坐标(u_p,v_p)为

$$u_p = \frac{u}{n/d} \qquad v_p = \frac{v}{n/d}$$

透视投影齐次坐标表示

- 记投影后的齐次坐标为(U,V,N,W)，则透视投影齐次坐标表示为：

$$\begin{pmatrix} U \\ V \\ N \\ W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/d & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ n \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \frac{U}{W} & \frac{V}{W} & \frac{N}{W} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{u}{n/d} & \frac{v}{n/d} & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_p & v_p & 1 \end{pmatrix}$$

平行投影

- 沿N轴、投影平面在$\boldsymbol{n}$=0的平行投影

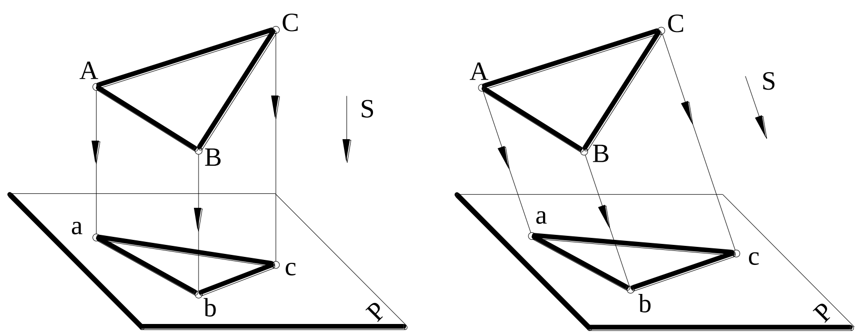
$$u_p = u$$

$$v_p = v$$

$$n_p = 0$$

关于投影：课后阅读

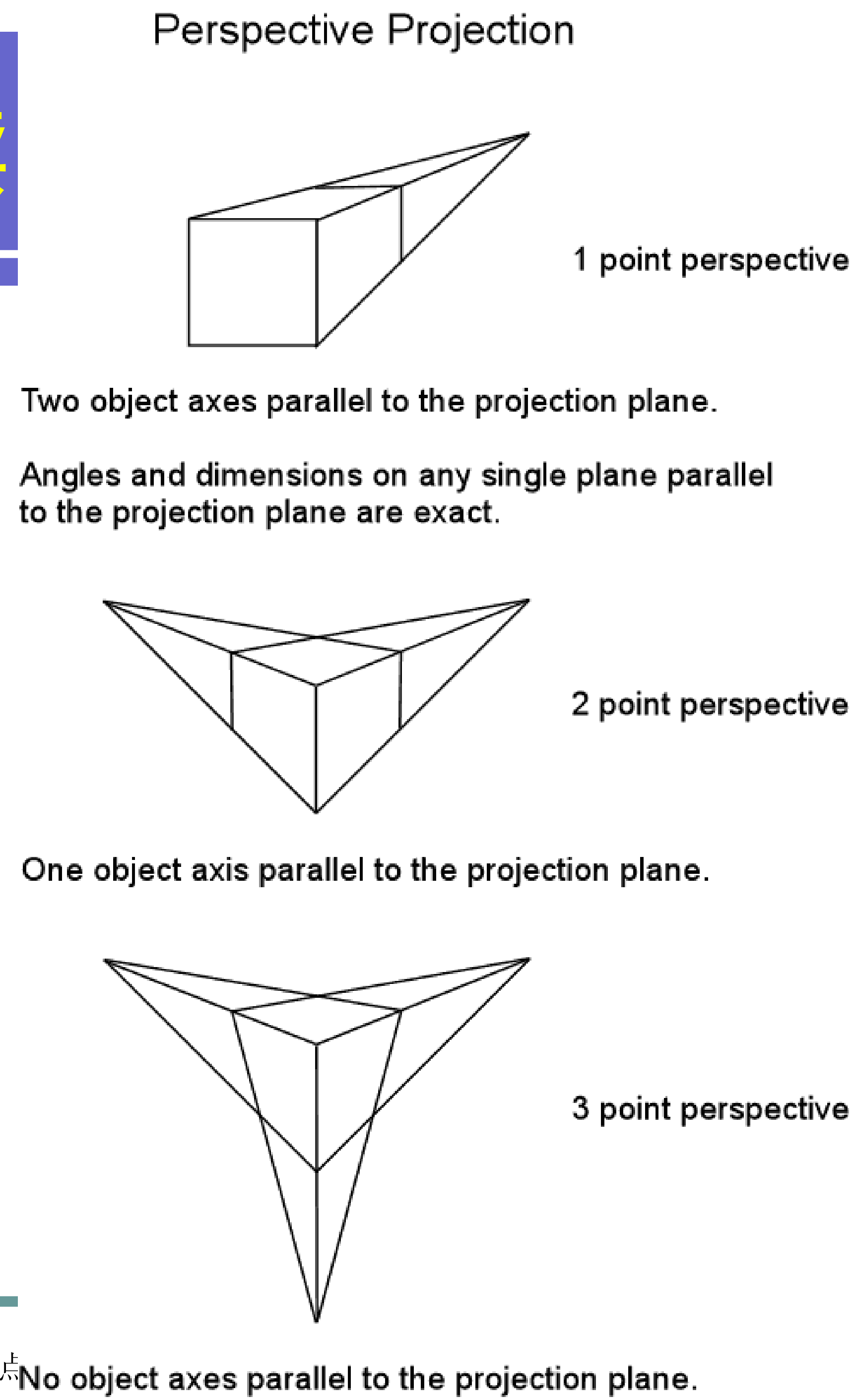
- 平行投影有哪几种？各有什么特点？具体的推导公式？



正投影　　　　斜投影

关于投影：课后阅读

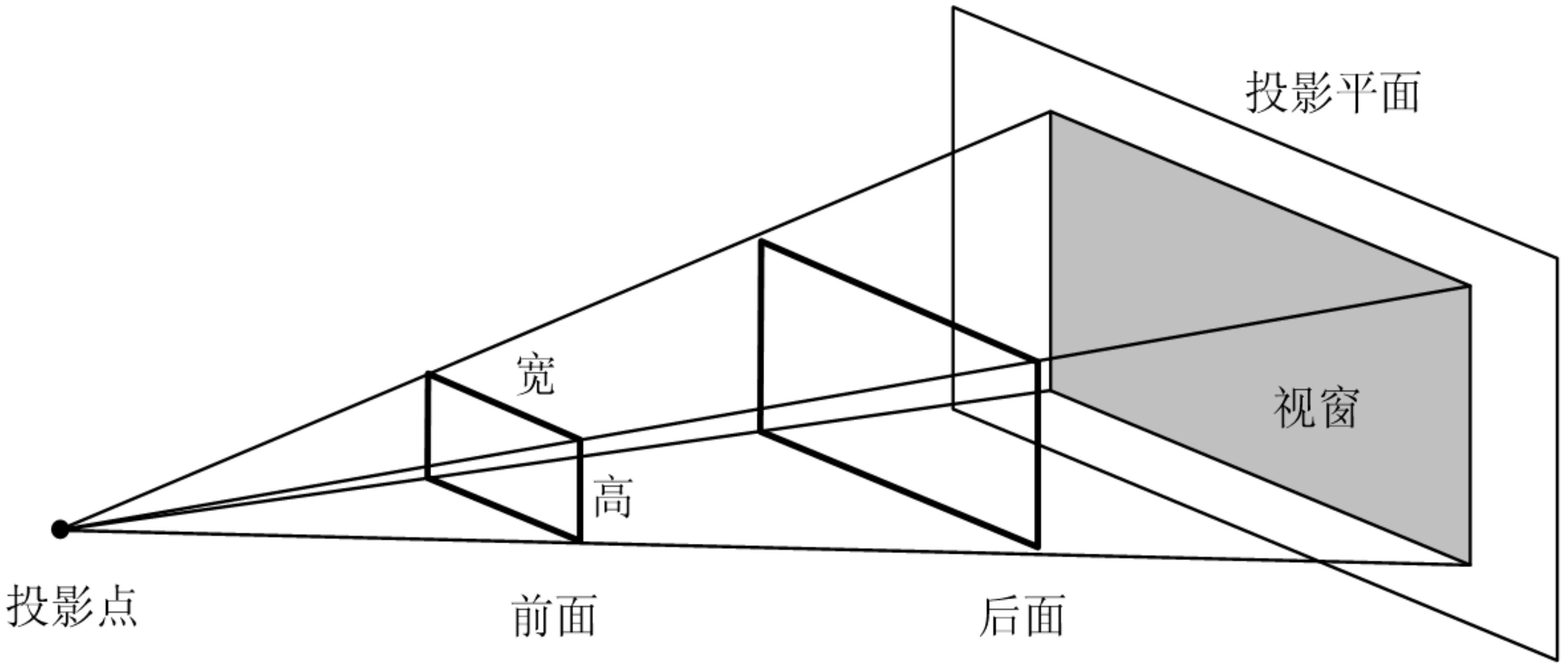
- 透视投影有哪几种？各有什么特点？具体的推导公式？



视域四棱锥台裁剪

- 视域四棱台：在透视投影中，位于“前面”和“后面”之间的部分视域四棱锥
- 视域四棱台裁剪：在进行透视投影变换时，只有位于视域四棱锥内部的几何物体才会被投影在投影平面上，而位于外部的物体将会被剔除
  - 透视投影：视域四棱台裁剪
  - 平行投影：视域长方体裁剪

视域四棱锥裁剪

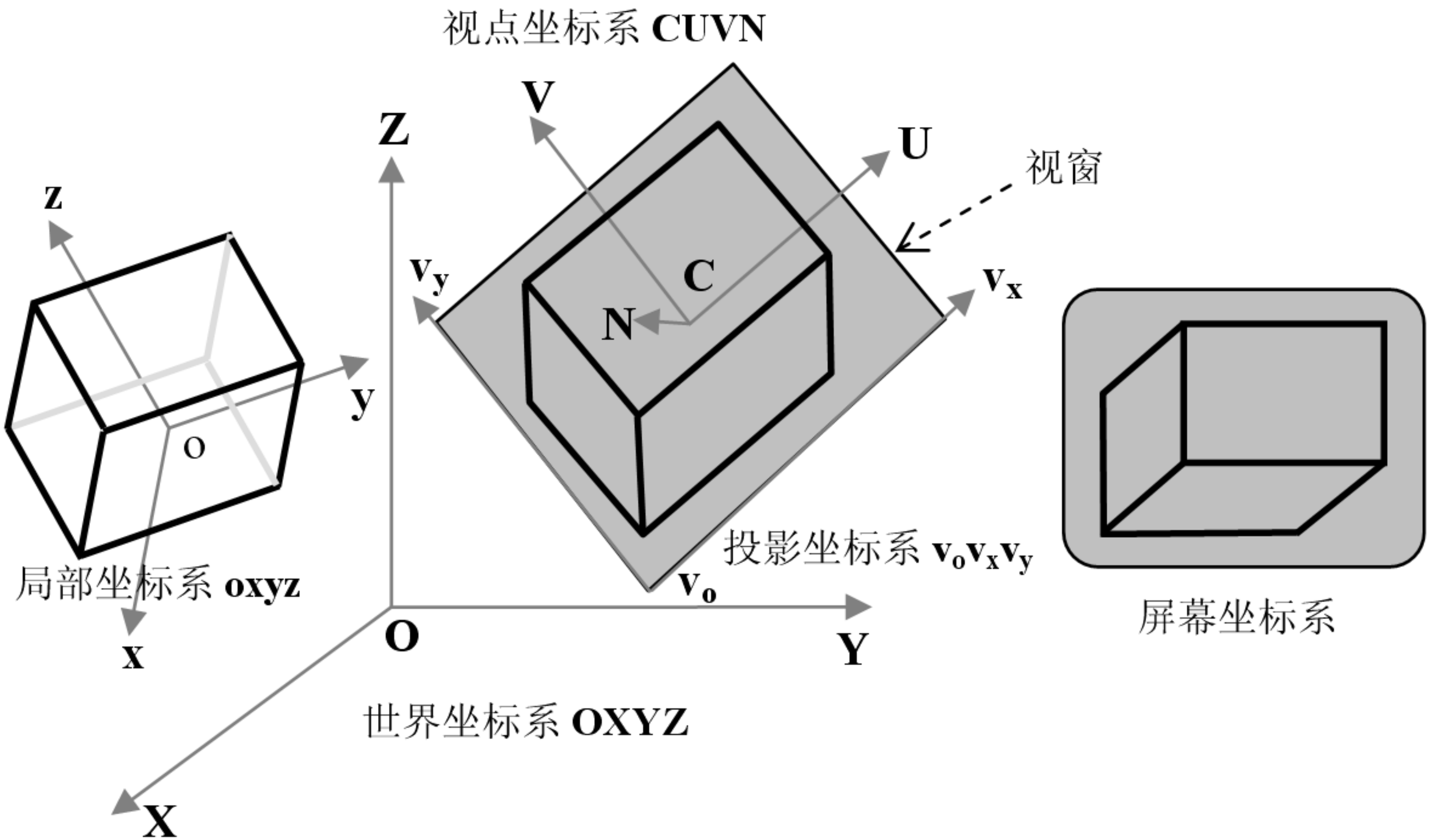


透视投影中的视域四棱

变换

- 二维变换
- 三维变换
  - 场景坐标系和模型变换
  - 视点坐标系和取景变换
  - 投影坐标系和投影变换
  - 屏幕坐标系和设备变换

三维变换中的各种坐标系



三维变换中的各种坐标系

规格化设备坐标和设备变换

- 在投影平面上，有一个矩形区域称为视窗
  - 上图坐标系中$v_o v_x v_y$的矩形和“视域四棱锥”图中的矩形
  - 物体投影后：二维齐次坐标表示
- 设备变换
  - 投影后二维齐次坐标除以最后一个坐标分量ω，便得到了规格化设备坐标

屏幕坐标系和视窗变换

- 屏幕坐标系：通常以像素为单位
- 视窗变换
  - 二维变换：将定义在视窗中的规格化设备坐标转换到以像素为单位的屏幕坐标
  - 扫描转换：将连续的几何物体转换为离散的光栅表示

小结

- 二维变换
- 三维变换
  - 场景坐标系和模型变换
  - 视点坐标系和取景变换
  - 投影坐标系和投影变换
  - 屏幕坐标系和设备变换