O Pipeline de Renderização

Processamento Gráfico

Marcelo Walter – UFPE

1

The Graphics Pipeline

- Processo de sintetizar imagens bidimensionais a partir de câmeras e objetos virtuais
- Visão em alto nível inicial para aprofundarmos nas próximas aulas
- Quais as etapas que constituem este processo??

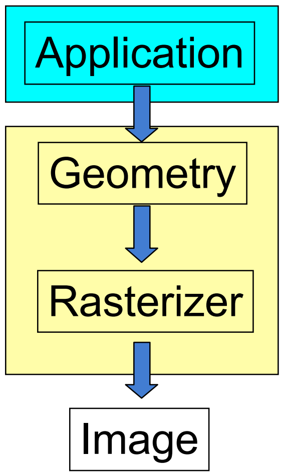
2

The Graphics Pipeline

- Três estágios conceituais
- O desempenho é determinado pelo estágio mais lento
- Sistemas gráficos modernos:

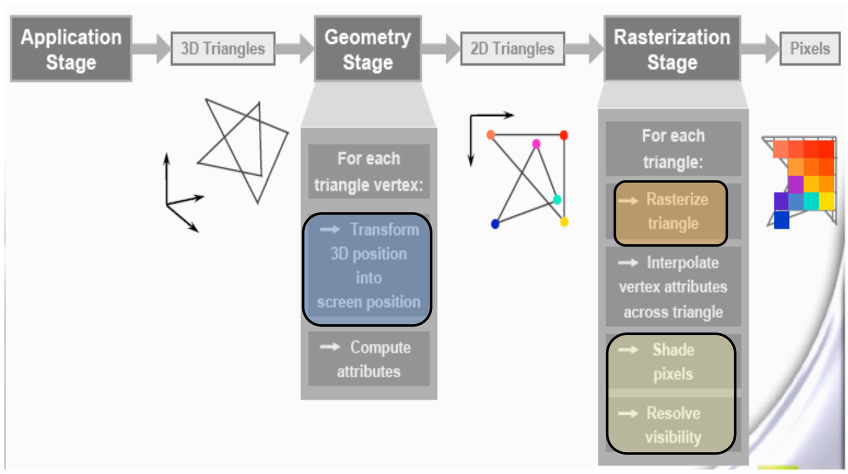
  software:

  hardware:

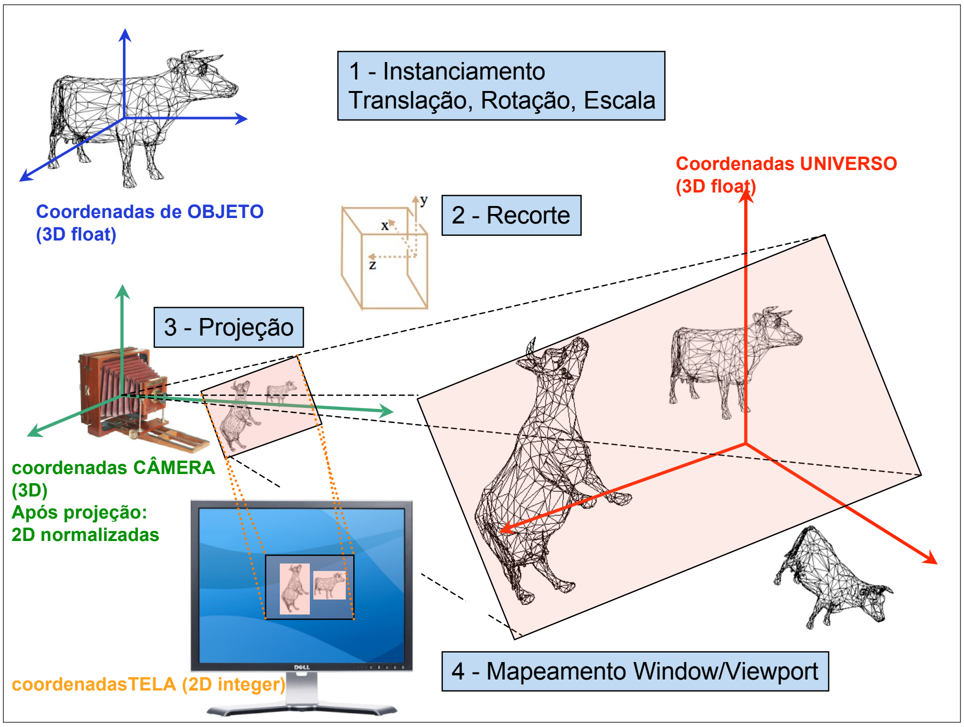


3

The Graphics Pipeline



4



Resumo

Transformações Modelagem

Iluminação (*Shading*)

Transformação Câmera

Recorte

Projeção

Rasterização

Visibilidade

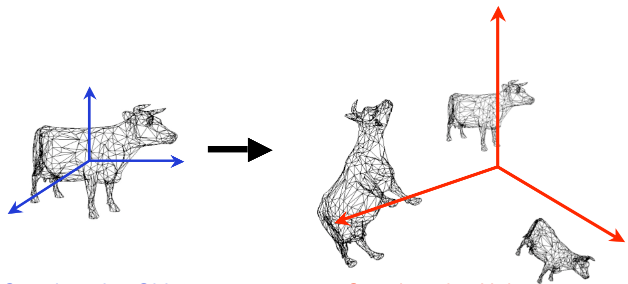
Adaptação e melhoramentos de uma aula sobre o mesmo assunto (MIT - EECS 6.837 Durand and Cutler)

Resumo

- Transformações Modelagem
- Iluminação (*Shading*)
- Transformação Câmera
- Recorte
- Projeção
- Rasterização
- Visibilidade

✓Objetos definidos no seu próprio sistema de coordenadas

✓Transformações de modelagem orientam os modelos geométricos num sistema comum de coordenadas (UNIVERSO)



Coordenadas Objeto

Coordenadas Universo

Resumo

- Transformações Modelagem
- Iluminação (*Shading*)
- Transformação Câmera
- Recorte
- Projeção
- Rasterização
- Visibilidade

✓Vértices iluminados de acordo com as propriedades geométricas e de material

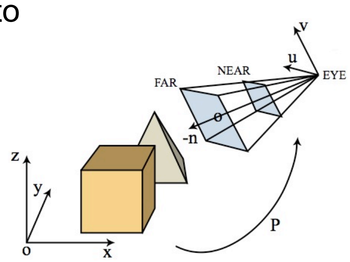
✓Modelo de Iluminação Local (Flat, Gouraud)

Resumo

- Transformações Modelagem
- Iluminação (*Shading*)
- **Transformação Câmera**
- Recorte
- Projeção
- Rasterização
- Visibilidade

✓Mapeamento de coordenadas de Universo para câmera

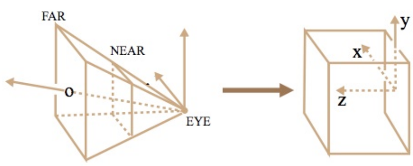
✓Escolha da projeção: perspectiva ou ortográfica



Resumo

- Transformações Modelagem
- Iluminação (*Shading*)
- Transformação Câmera
- **Recorte**
- Projeção
- Rasterização
- Visibilidade

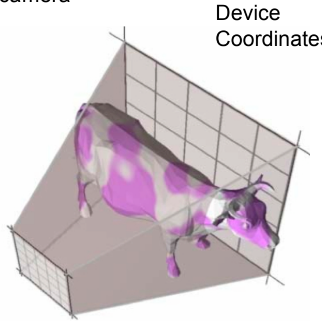
✓Transformação para Coordenadas Normalizadas



câmera

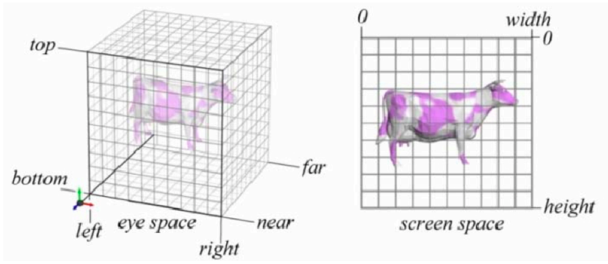
Normalized Device Coordinates

✓Eliminação de objetos inteiros e partes de objeto que estão fora do *Frustum*



Resumo

- Transformações Modelagem
- Iluminação (*Shading*)
- Transformação Câmera
- Recorte
- **Projeção**
- Rasterização
- Visibilidade



NDC

Coordenadas de Tela

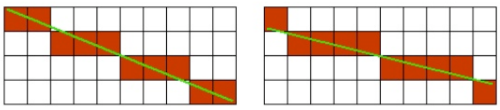
✓Os vértices são projetados para coordenadas de tela

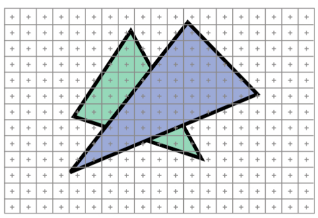
Resumo

- Transformações Modelagem
- Iluminação (*Shading*)
- Transformação Câmera
- Recorte
- Projeção
- **Rasterização**
- Visibilidade

✓Rasterização das linhas em pixels e possível preenchimento

✓Interpolação dos valores (profundidade, normal, cor) dos vértices conforme necessidade





Resumo

Transformações Modelagem

Iluminação (*Shading*)

Transformação Câmera

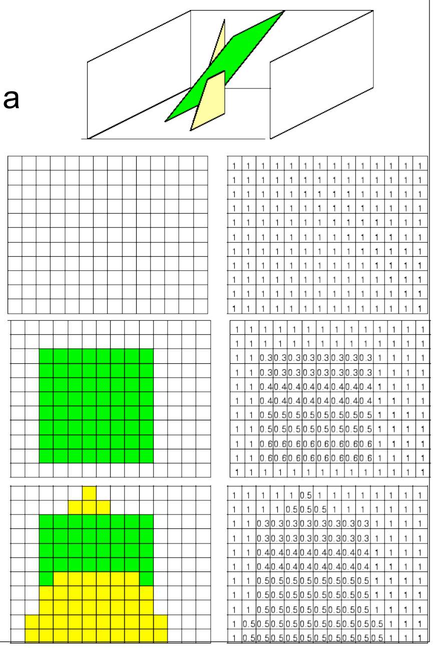
Recorte

Projeção

Rasterização

Visibilidade

✓Z-buffer: cada pixel armazena a coordenada z mais próxima



Transformações Modelagem

Iluminação (*Shading*)

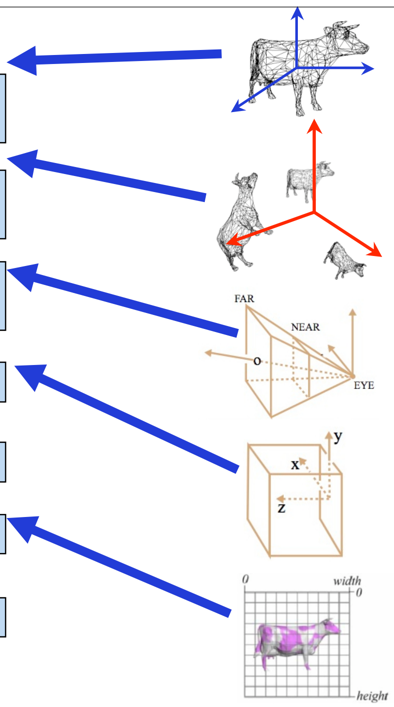
Transformação Câmera

Recorte

Projeção

Rasterização

Visibilidade



Espaço de Objeto

Espaço de Universo

Espaço da câmera

Espaço de recorte

Espaço de tela

Sistemas de Coordenadas

- Objeto
  - Local a cada objeto
- Universo
  - Comum a todos os objetos
- Câmera
  - Derivado a partir da especificação do *Frustum* de visibilidade
- Clip space/NDC
  - [−1,−1,−1] ⟶ [1,1,1]
- Tela
  - (0,0) → [largura, altura]

15

O que são Transformações?

- Mapeiam pontos (x,y,z) em um sistema de coordenadas para pontos (x',y',z') em outro sistema de coordenadas
- São utilizadas em CG para:
  - Posicionar objetos na cena
  - Mudar forma dos objetos
  - Criar múltiplas cópias dos objetos
  - Animações
  - Projeção para câmera virtual

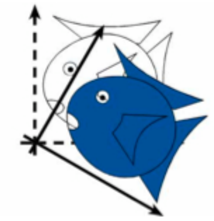
16

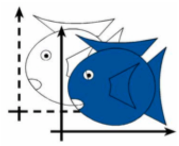
Classes de Transformações

- Corpos rígidos
  - Preservam distância e ângulos

Corpos Rígidos

Translação Rotação





Classes de Transformações

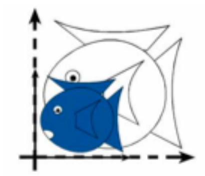
- Similares
  - Preservam ângulos

Similares

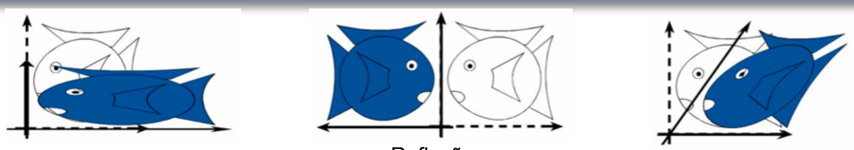
Corpos Rígidos

Translação Rotação

Escala uniforme



Transformações Lineares



Escala

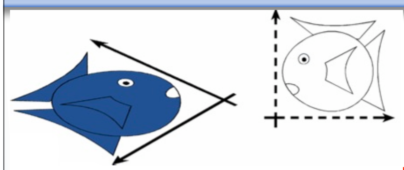
Reflexão

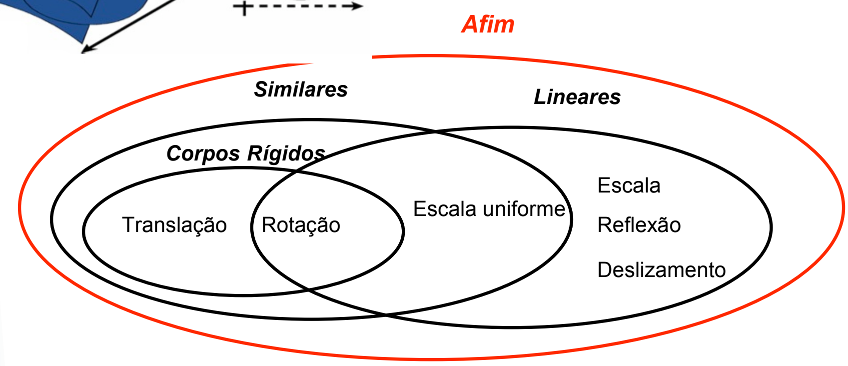
Deslizamento (*shear*)

L(p+q) = L(p) + L(q)
L(ap) = aL(p)

19

Transformações Afim





Preservam linhas paralelas

20

Representando Transformações

- Genericamente em 2D

$$x' = ax + by + c$$
$$y' = dx + ey + f$$

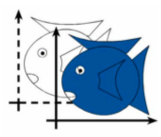
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ d & e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ f \end{bmatrix}$$

$$p' = Mp + t$$

21

Transformações 2D – Translação

$$x' = x + t_x$$
$$y' = y + t_y$$

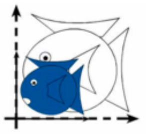


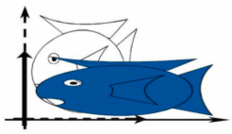
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}$$

22

Transformações 2D – Escala

- Coordenadas são multiplicados pelos fatores de escala
- Tipos de Escala
  - Uniforme:
    - sx = sy
  - Não-Uniforme
    - sx <> sy



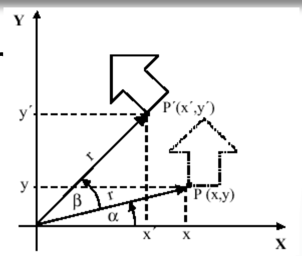


$$x' = x \cdot s_x$$
$$y' = y \cdot s_y$$

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

Transformações 2D – Rotação

- Como chegar à matriz de r



$$\boxed{\begin{aligned} \sin(\alpha+\beta) &= \cos\alpha.\sin\beta + \sin\alpha.\cos\beta \\ \cos(\alpha+\beta) &= \cos\alpha.\cos\beta - \sin\alpha.\sin\beta \end{aligned}}$$

$x = r.\cos\alpha \qquad y = r.\sin\alpha$

$x' = r.\cos(\alpha+\beta) \qquad y' = r.\sin(\alpha+\beta)$

$x' = r.\cos\alpha.\cos\beta - r.\sin\alpha.\sin\beta$

$y' = r.\cos\alpha.\sin\beta + r.\cos\alpha.\sin\beta$

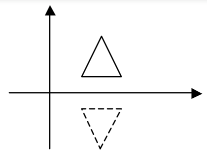
$x' = x.\cos\beta - y.\sin\beta$

$y' = x.\sin\beta + y.\cos\beta$

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

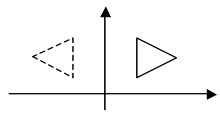
Transformações 2D – Reflexão

- Ao longo do eixo X



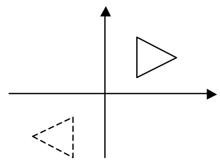
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ -y \end{pmatrix}$$

- Ao longo do eixo Y



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

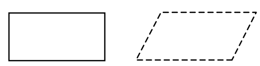
- XY $\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x \\ -y \end{pmatrix}$



25

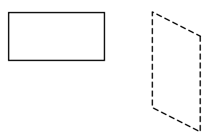
Transformações 2D – Deslizamento

- Deslizamento na direção x



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

- Deslizamento na direção y



$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ Sh_y & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ Sh_x \cdot x + y \end{pmatrix}$$

26

Resumo Transformações 2D

- Notação matricial simplifica escrita
  - Translação expressa como uma soma de vetores
  - Escala e Rotação expressas como multiplicação
- Porém, é interessante uma notação uniforme e consistente
  - Permitir que se expresse as três operações de maneira idêntica
  - Permitir que se expresse a combinação destas três operações também de maneira idêntica
- Como fazer isso?

27

Coordenadas Homogêneas

- Adiciona uma outra dimensão *w*
- 2D -> 3D
  - (x,y) -> (x,y,w)
- 3D -> 4D
  - (x,y,z) -> (x,y,z,w)
- w = 0, pontos no infinito
  - Útil em projeções;
- Homogeneizar: dividir por w
- Em CG SEMPRE se usa w=1!

28

Qual a vantagem?

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

$$\begin{cases} x' = x + wt_x \\ y' = y + wt_y \\ w' = \quad w \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dfrac{x'}{w'} = \dfrac{x}{w} + t_x \\ \dfrac{y'}{w'} = \dfrac{y}{w} + t_y \end{cases}$$

Translação agora também pode ser representada por multiplicação de matrizes!!

29

Escala – Coord. Homogêneas

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

$$\begin{cases} x' = s_x x \\ y' = s_y y \\ w' = w \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dfrac{x'}{w'} = s_x \dfrac{x}{w} \\ \dfrac{y'}{w'} = s_y \dfrac{y}{w} \end{cases}$$

30

Rotação – Coord. Homogêneas

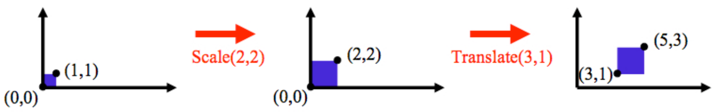
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \frac{x'}{w'} = \cos\theta \, \frac{x}{w} - \sin\theta \, \frac{y}{w} \\ \frac{y'}{w'} = \sin\theta \, \frac{x}{w} + \cos\theta \, \frac{y}{w} \end{cases}$$

$$\begin{cases} x' = \cos\theta x - \sin\theta y \\ y' = \sin\theta x + \cos\theta y \\ w' = w \end{cases}$$

Composição de Transformações

Escala seguida de Translação

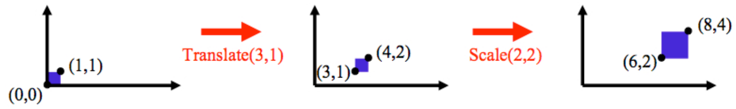


$$p' = T(Sp) = TSp$$

$$TS = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 3 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Composição de Transformações

Translação seguida de Escala



$$p' = S(Tp) = STp$$

$$ST = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 6 \\ 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

33

Composição de Transformações

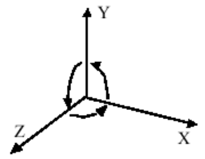
- Multiplicação de Matrizes não é comutativa
- Ordem das operações influencia diretamente
  - Rotação seguida de translação é diferente de translação seguida de rotação

- http://www.cs.princeton.edu/~min/cs426/jar/transform.html

34

Translação/Escala 3D

- Translação – `glTranslatef(tx, ty, tz)`
  - T(tx, ty, tz): $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
- Escala – `glScalef(Sx, Sy, Sz)`
  - S(Sx, Sy, Sz): $\begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$



Sistema de Coordenadas
"mão direita"
tri-ortonormado

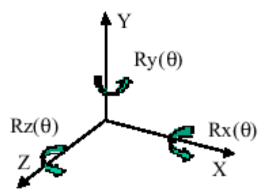
35

Rotação 3D

- Rotação

$$R_z(\theta): \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad R_y(\theta): \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_x(\theta): \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



36

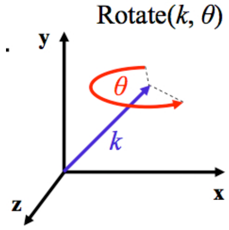
Rotação – Eixo genérico

Fórmula de Rodrigues

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_x k_x(1-c)+c & k_z k_x(1-c)-k_z s & k_x k_z(1-c)+k_y s & 0 \\ k_y k_x(1-c)+k_z s & k_z k_x(1-c)+c & k_y k_z(1-c)-k_x s & 0 \\ k_z k_x(1-c)-k_y s & k_z k_x(1-c)-k_x s & k_z k_z(1-c)+c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

onde c = cos θ   s = sin θ

Rotate(k, θ)



- `glRotatef(angle,x,y,z)`

37