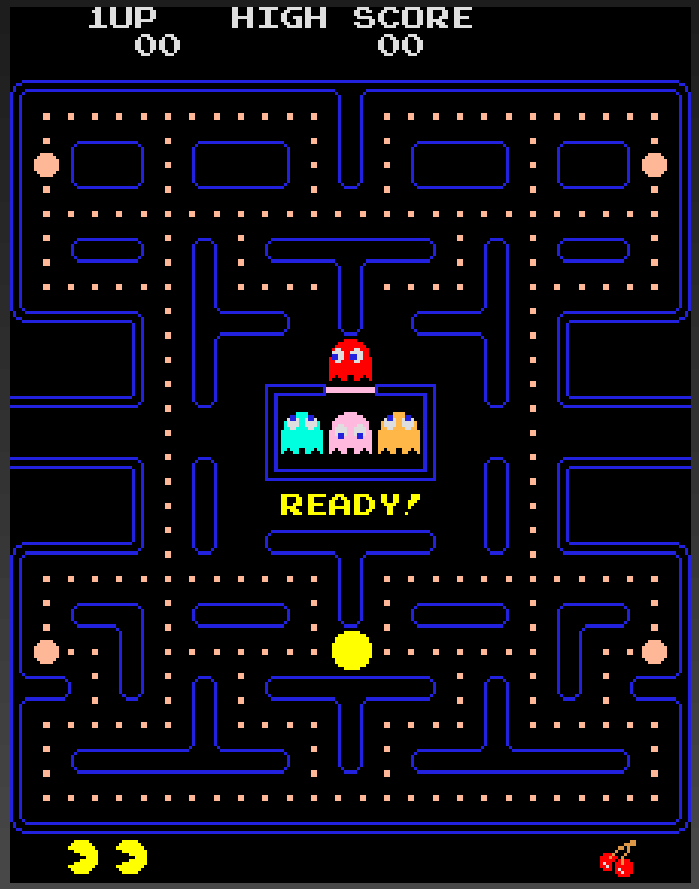
3D

3D Intro

- 2D nebo 3D?

Pacman (1980)



Wolfenstein 3D (1992)

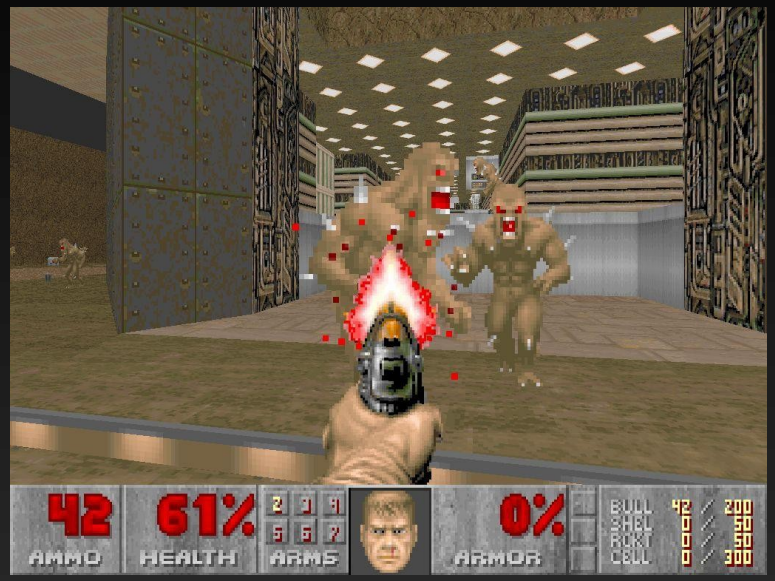
Sprite

FLOOR
5
SCORE
102500
LIVES
4
HEALTH
84%
AMMO
27

Guard from "Wolfenstein 3D" (PC)
Ripped by Grim.
Please give credit.
Only to be archived at:
http://sdb.neuropod.net

2D vs. 3D

Doom 1 (1993)



Duke Nukem 3D (1996)

Descent (1995)

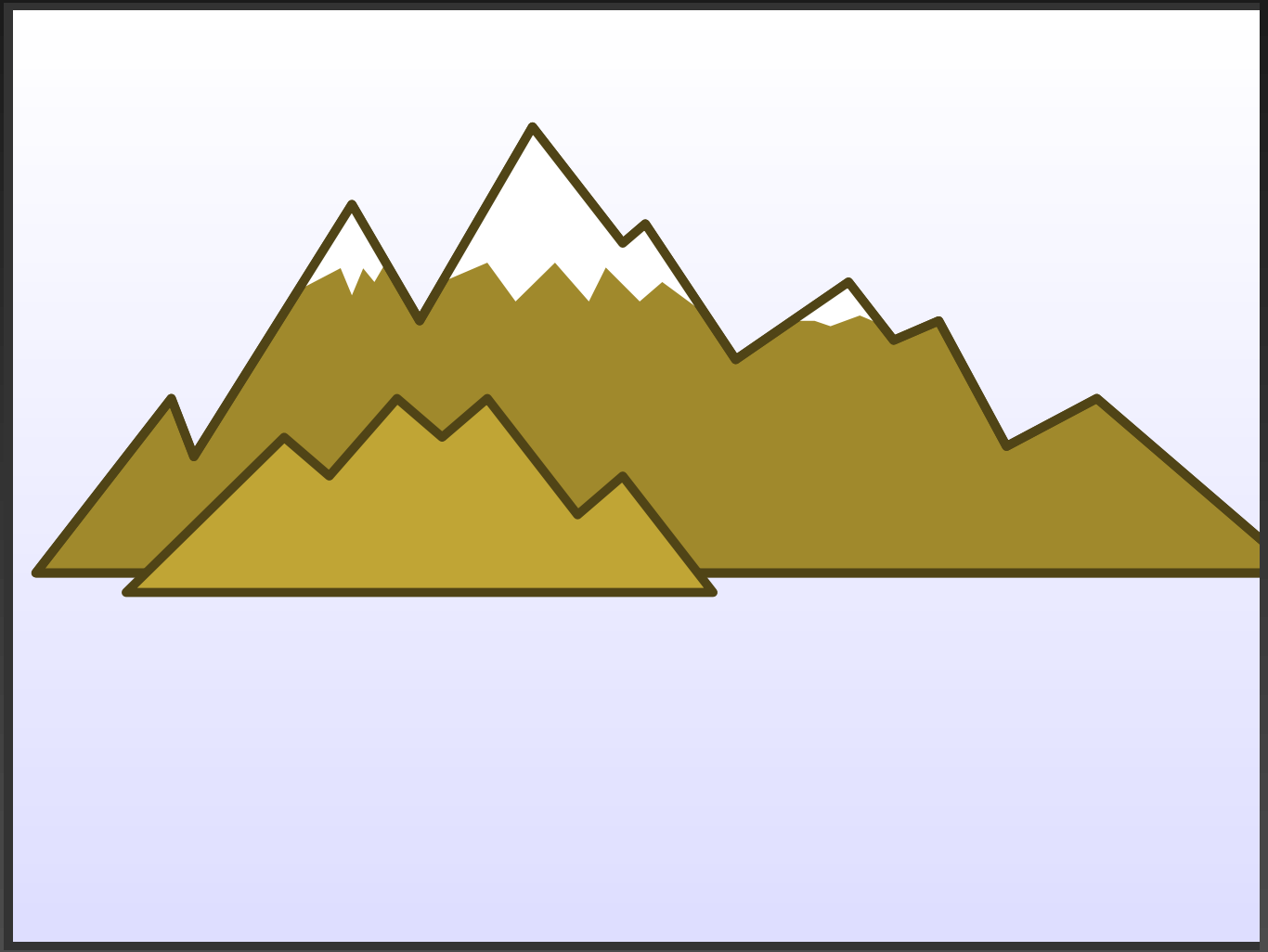
https://steamuserimages-a.akamaihd.net/ugc/203053761726302995/50811AF808D461C5120DB83662F735E981440A0D/

MP4 demo, 2:30

https://media.giphy.com/media/CzTu1z70W0tfa/source.gif

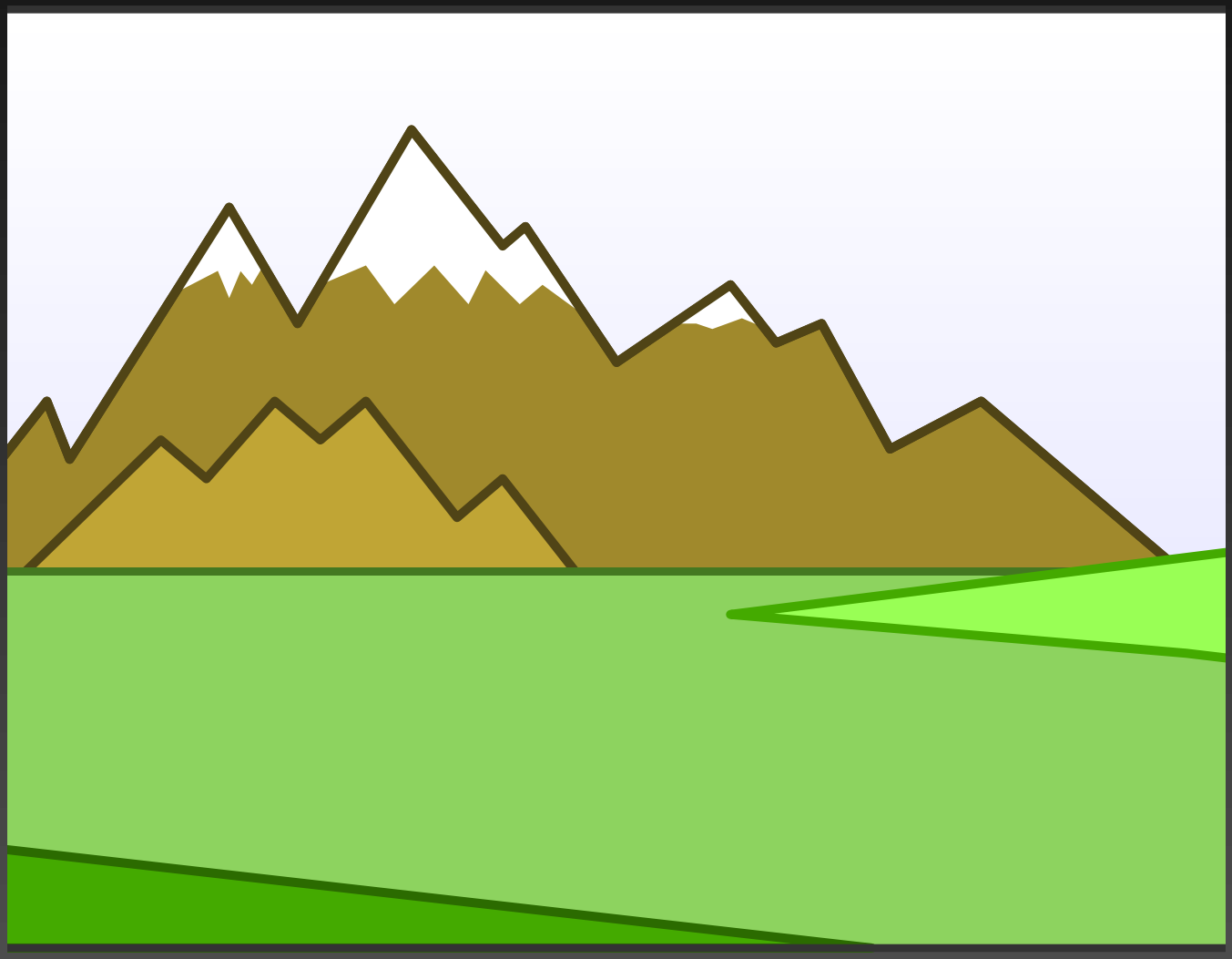
Malířův algoritmus

- pro pseudo 3D



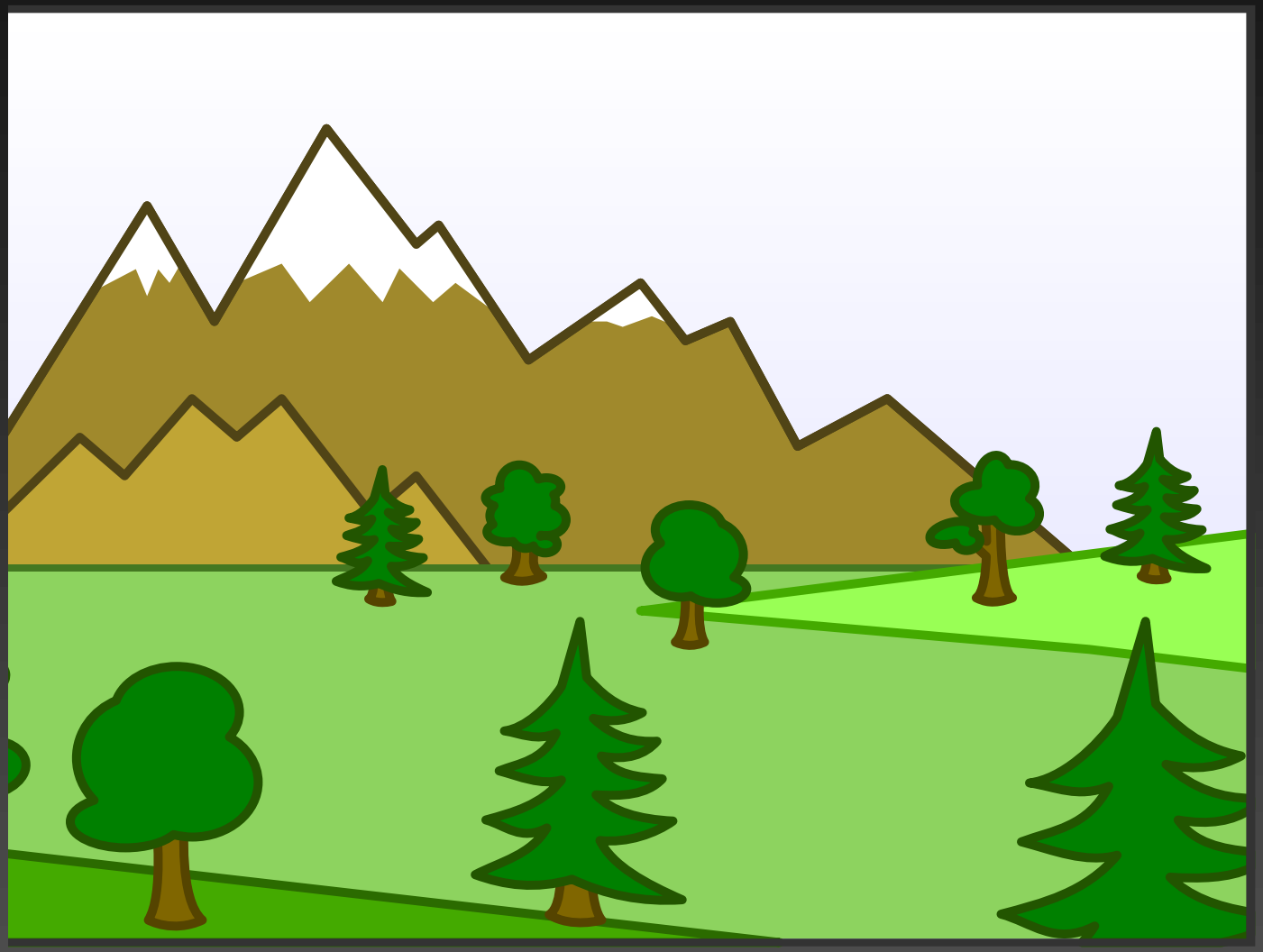
Malířův algoritmus

- pro pseudo 3D



Malířův algoritmus

- pro pseudo 3D

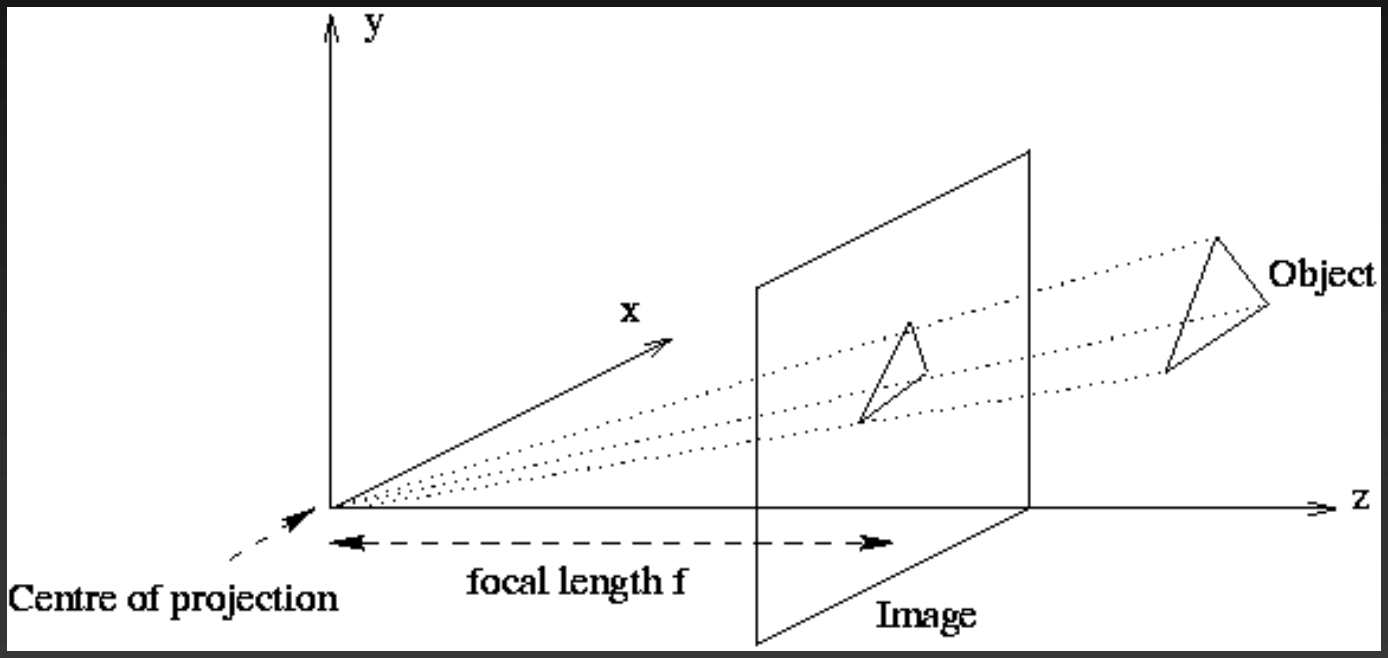


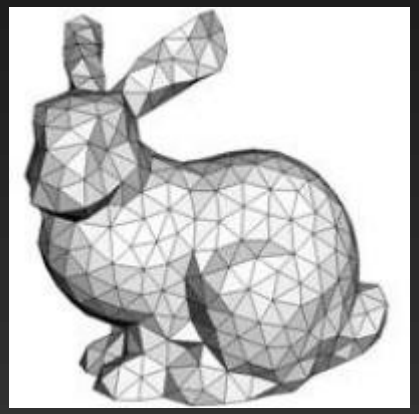
3D dnes

- současná 3D grafika v reálném čase je založena na několika jednoduchých principech, v tomto pořadí
  1) Reprezentace objektu 3D vektorovými daty
     - obálka pomocí vrcholů, hran, plošek, normál
  2) Transformace 3D objektů
     - základní transformace: posun, otočení, změna měřítka
     - převod na 2D vektory: projekce 3D vektorů do plochy
  3) Rasterizace
  4) Obarvení rastru pomocí materiálů, světel, textur, …
  5) Vyřešení zakrývání a průhlednosti

3D

- Síť trojúhelníků, projekce 3D → 2D, …

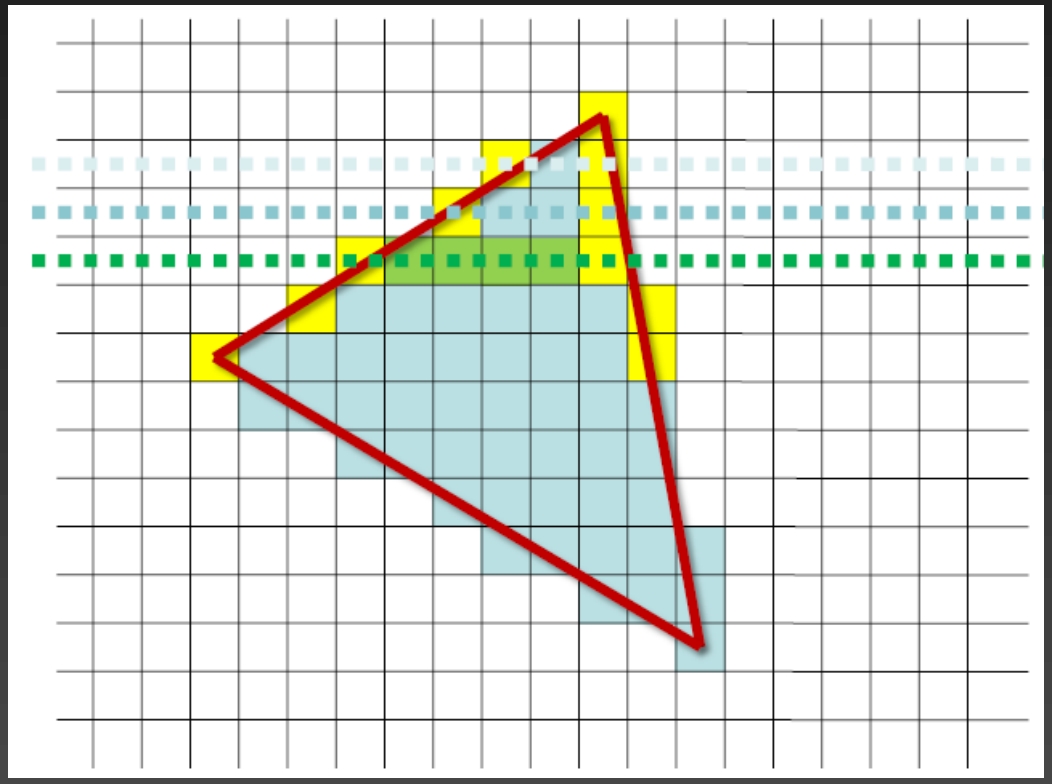


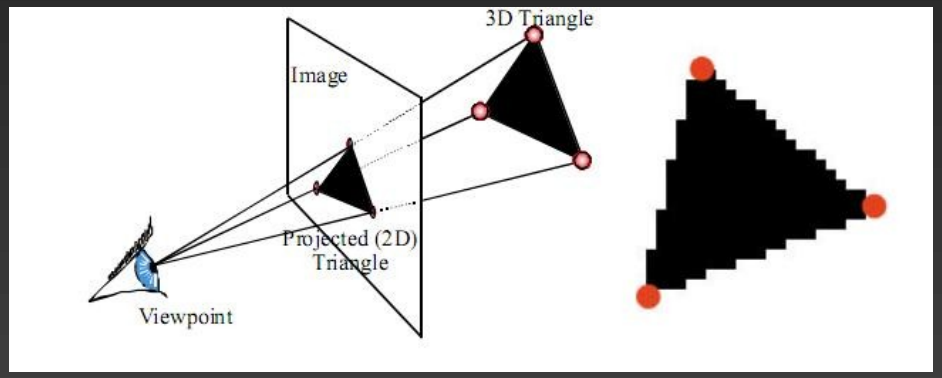


$$\boldsymbol{x}' = \boldsymbol{M}\boldsymbol{x} \qquad \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 0 \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

3D

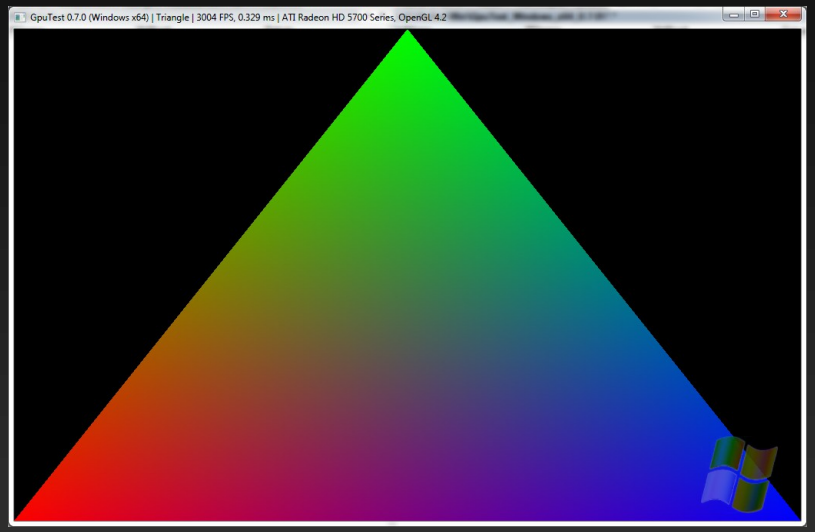
- Rasterizace – např. scanline algoritmus
  - interpolace souřadnic

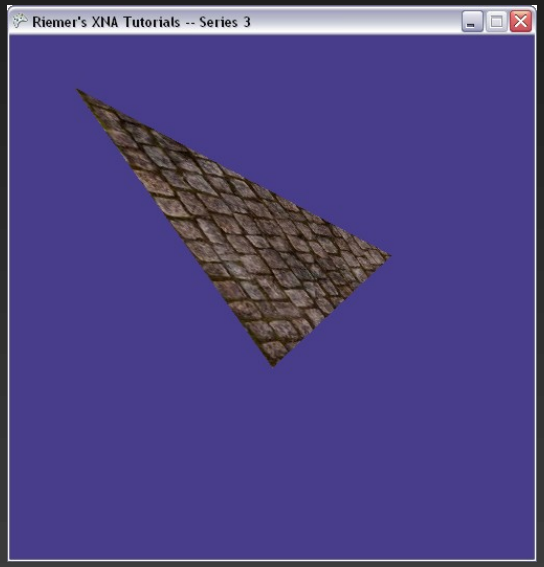




3D

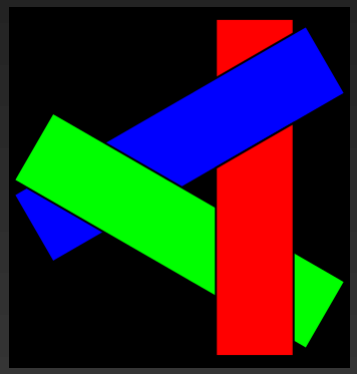
- Obarvení, textury, …

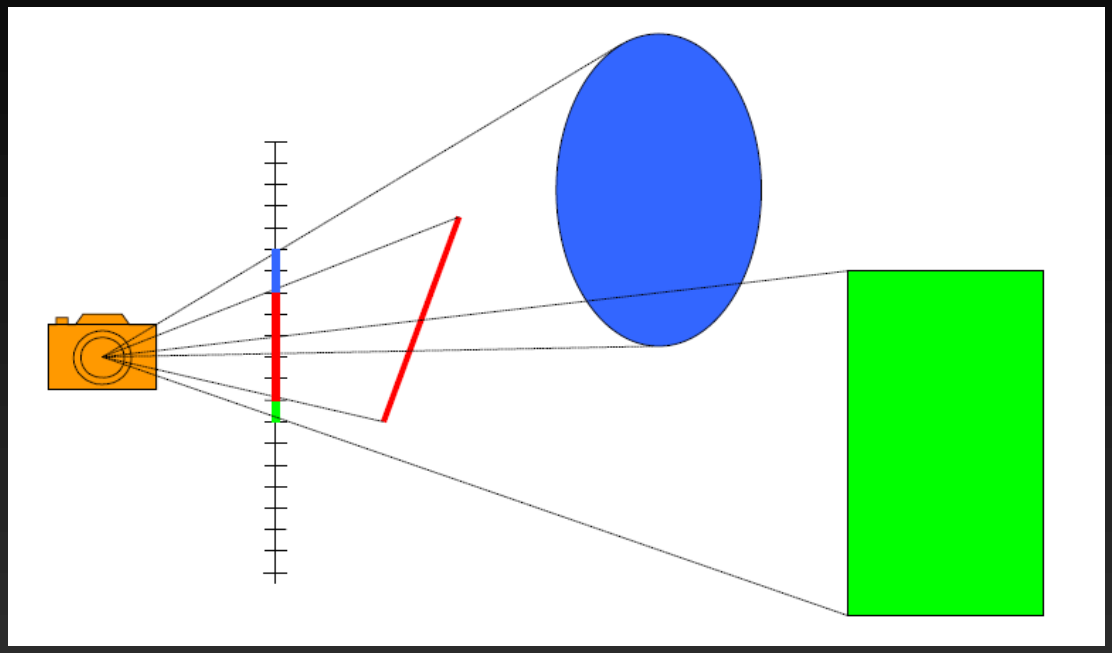


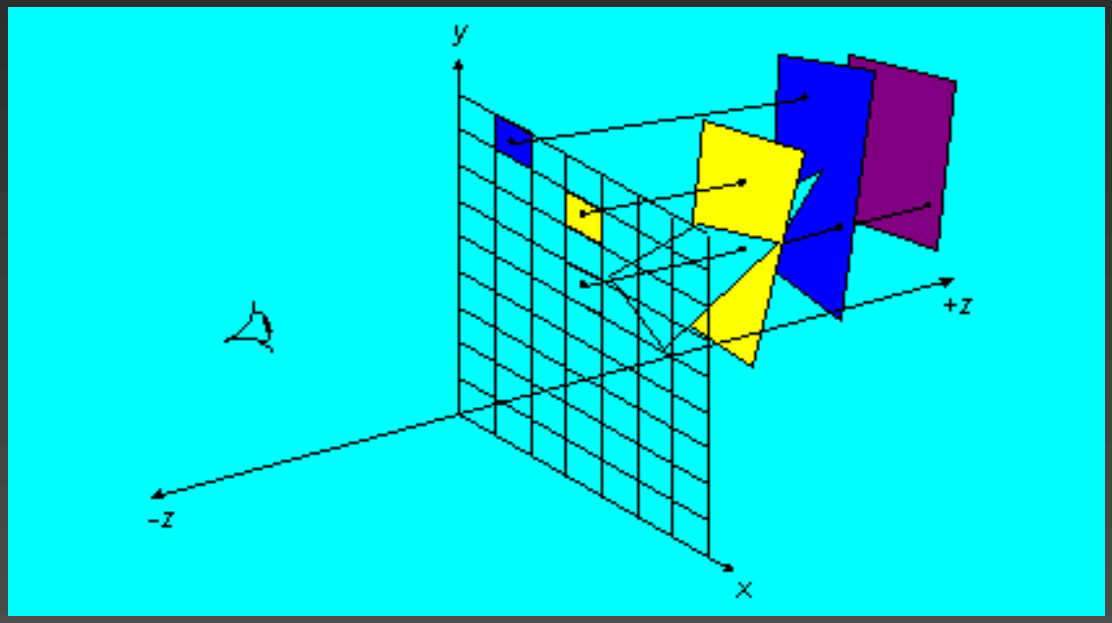


3D

- Paměť hloubky …

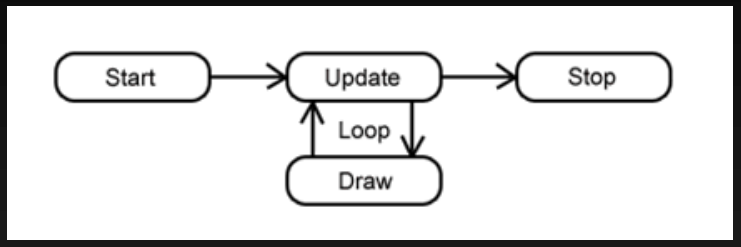


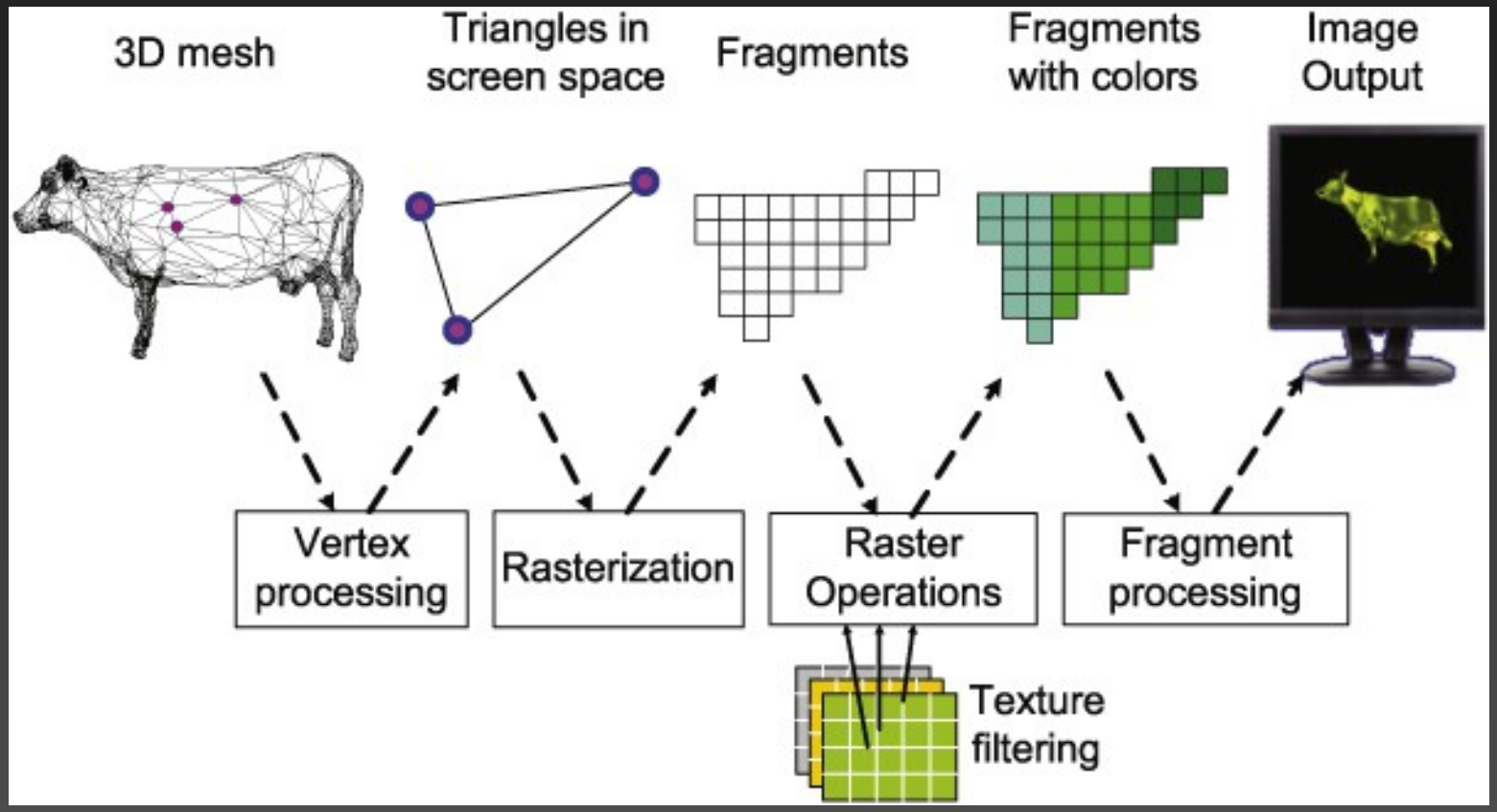




Soudobá real-time 3D grafika

1) 3D data: vektorový model z trojúhelníků
2) transformace a projekce 3D → 2D
3) rasterizace
4) obarvení fragmentu
5) řešení hloubky a průhlednosti pro každý fragment



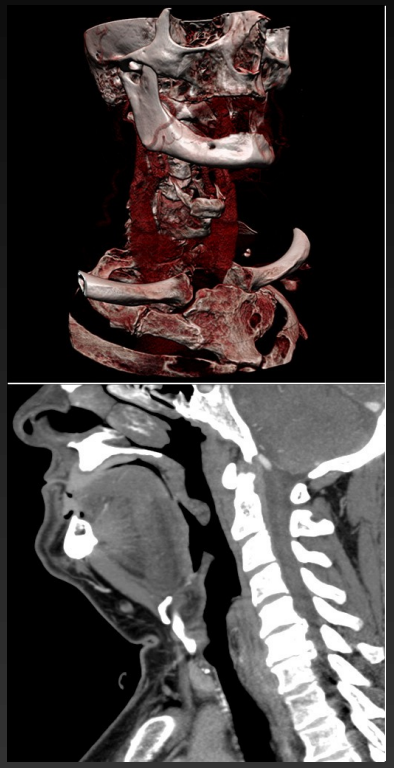


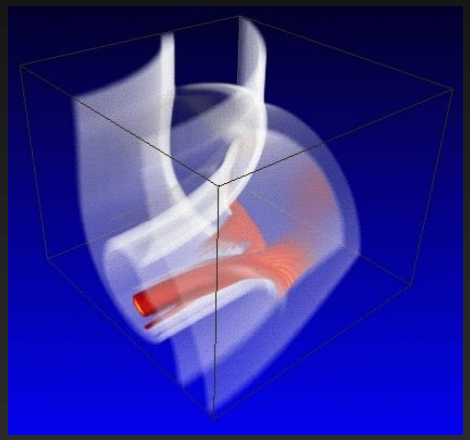
3D reprezentace

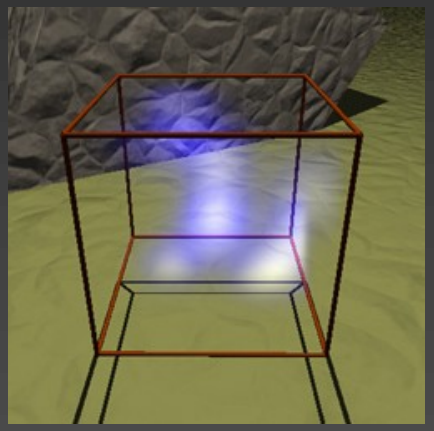
Objemová reprezentace (= 3D raster)

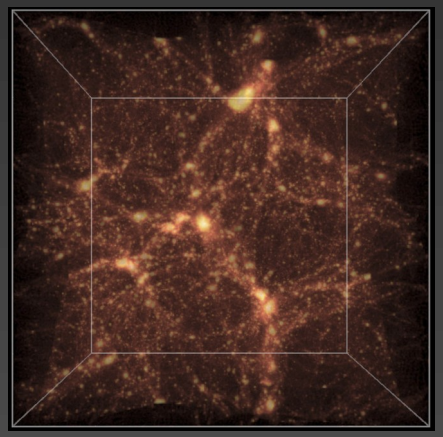
- Základní jednotka
  - voxel = volumetric pixel
- Velký objem dat
  - 1024x1024x1024xRGBA = 4 GiB
- Speciální účely
  - magnetická rezonance
  - fyzikální simulace
    - mlha, kouř, kapaliny...

- Nejčastěji sada 2D obrázků (ale existuje i např. 3D JPEG)



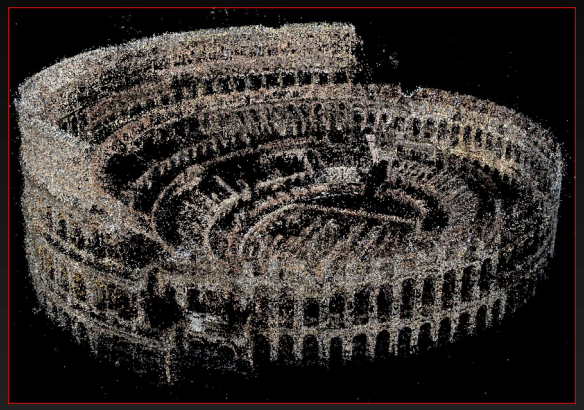


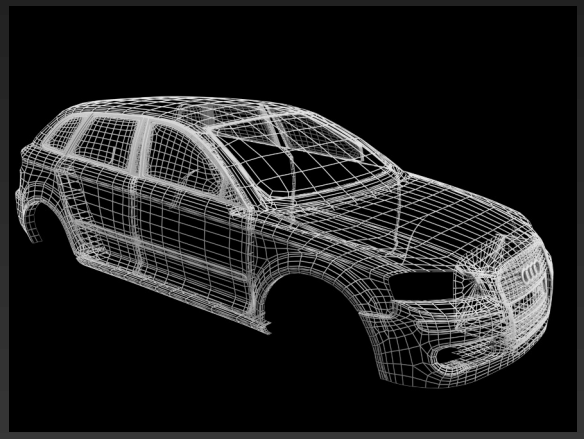


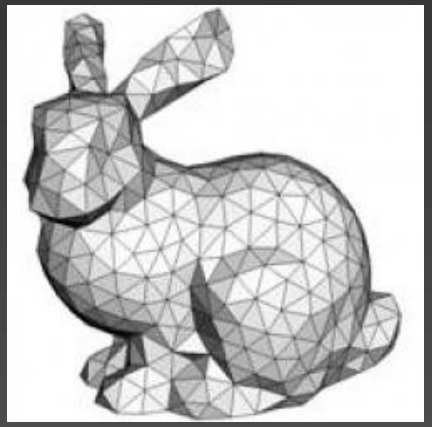


Hraniční reprezentace

- 3D vektorový popis obálky (tj. hranice, slupky) objektu
  - Polygonální popis
    - vertexy (tj. body)
    - hrany
    - plošky + normálové vektory
  - Křivky (NURBS, spline, …)
  - CSG – Constructive Solid Geometry
  - Implicitní plochy

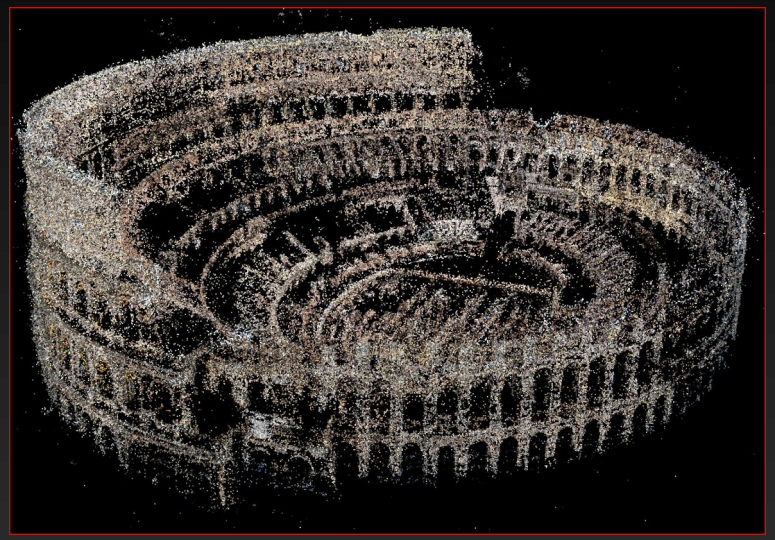


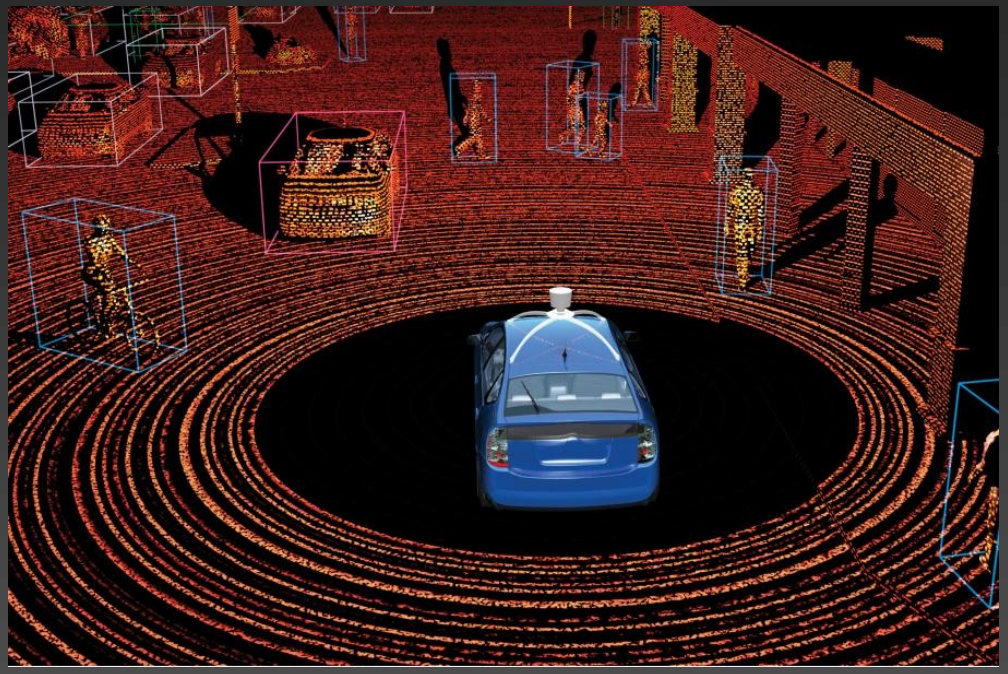




Hraniční reprezentace pomocí bodů (vertexů)

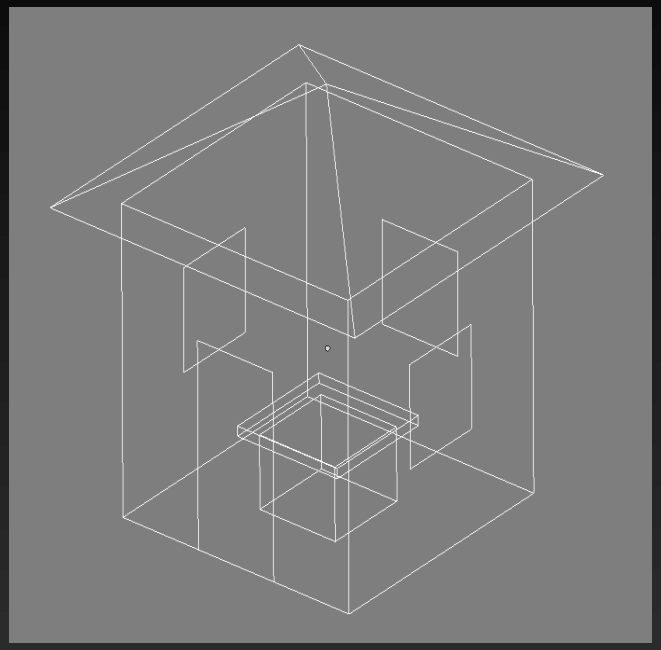
- Pouze vertexy
- 3D laserové skenování
  - bod má pozici, barvu, normálu, …
- Velké objemy dat
  - menší než objemová reprezentace (popisujeme jen obálku, ne celý objem)

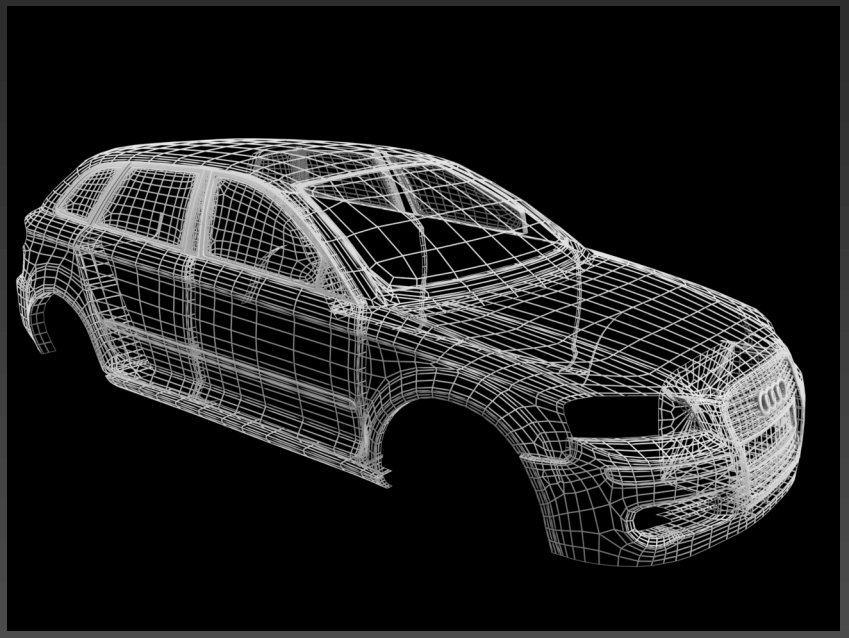




Hraniční reprezentace pomocí hran

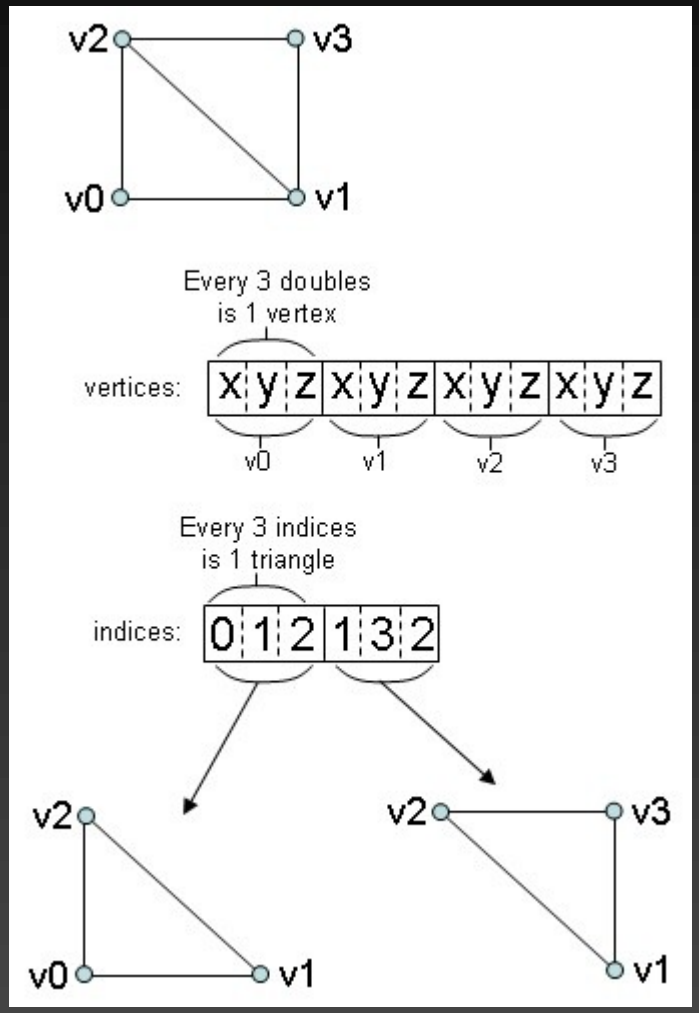
- Pouze vertexy a jejich spojení - hrany
- Jednoduché na vykreslení
  - není třeba řešit viditelnost a vyplnění ploch
- … zároveň obtížné
  - … pokud máme mnoho hran
  - všechno je vždy vidět, nic nelze vynechat





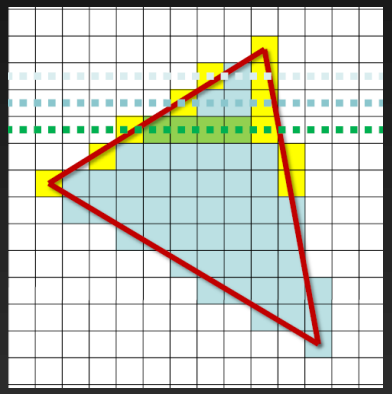
Hraniční reprezentace pomocí plošek

- Topologie – obsahuje informace o ploškách
- Trojúhelníková síť
  - pole trojic indexů do dalšího pole s vertexy
- Polygonální síť
  - pole n-tic indexů různé délky
  - šetří paměť, komplikuje vykreslení



Trojúhelníková síť

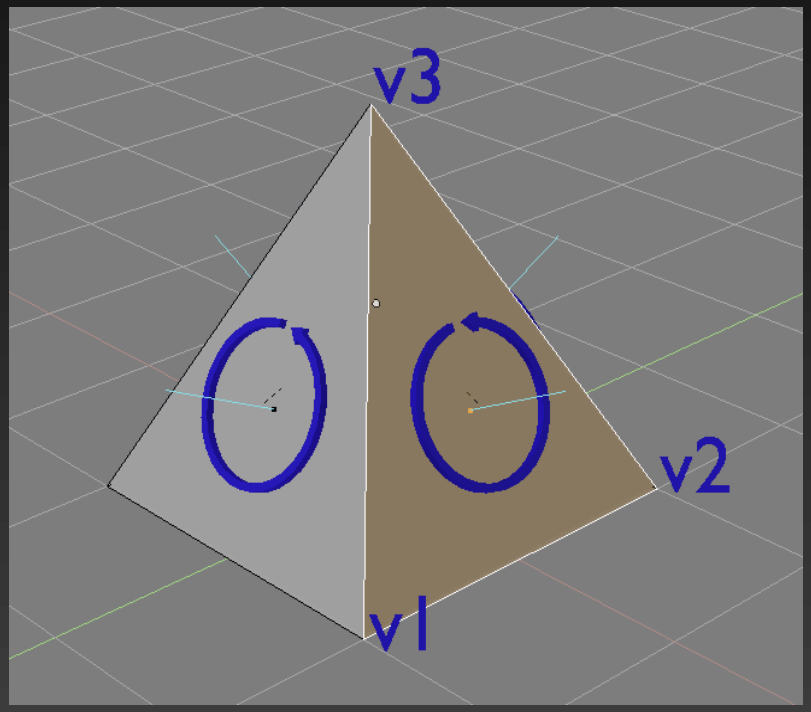
- Trojúhelník
  - všechny body vždy v rovině (definuje rovinu)
  - vždy konvexní
  - jednoduché na rasterizaci
    - HW akcelerace



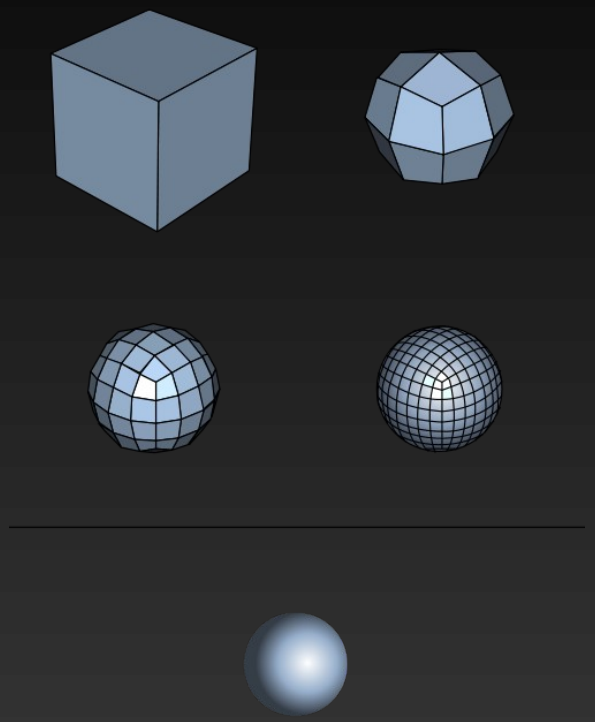
- Trojúhelníková síť
  - geometrie … kde jsou vertexy?
  - topologie … jak jsou spojené?

Plošky

- Přední strana určena směrem normály
  - dáno pořadím zadávání vertexů
  - CCW – Counter Clock Wise
    - obvyklé, doporučené
    - pravidlo pravé ruky
  - CW – Clock Wise
    - možné, ale nepoužívá se

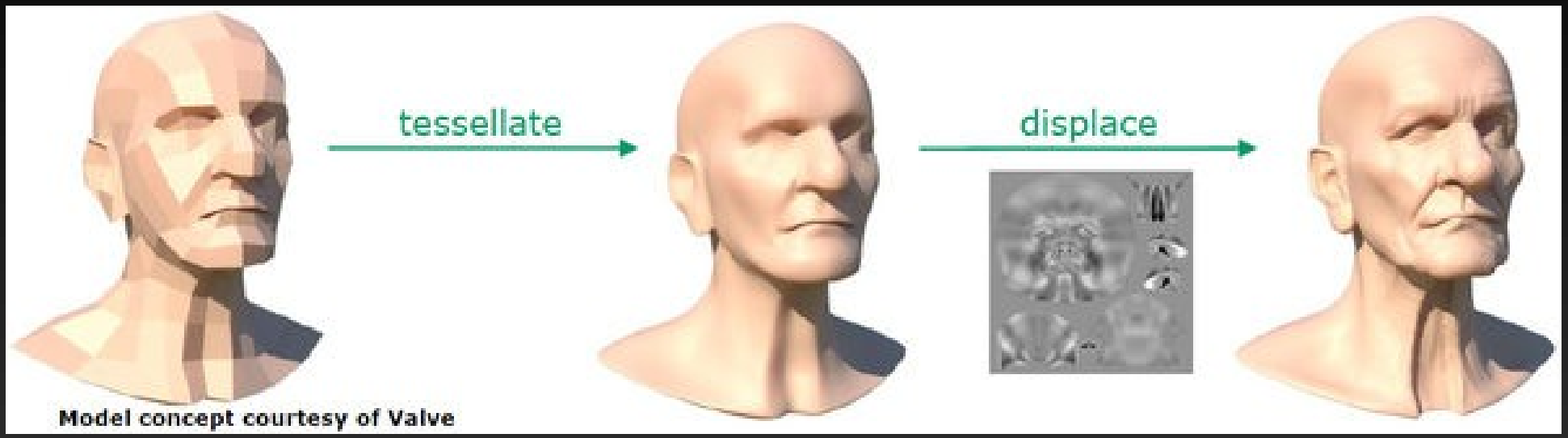


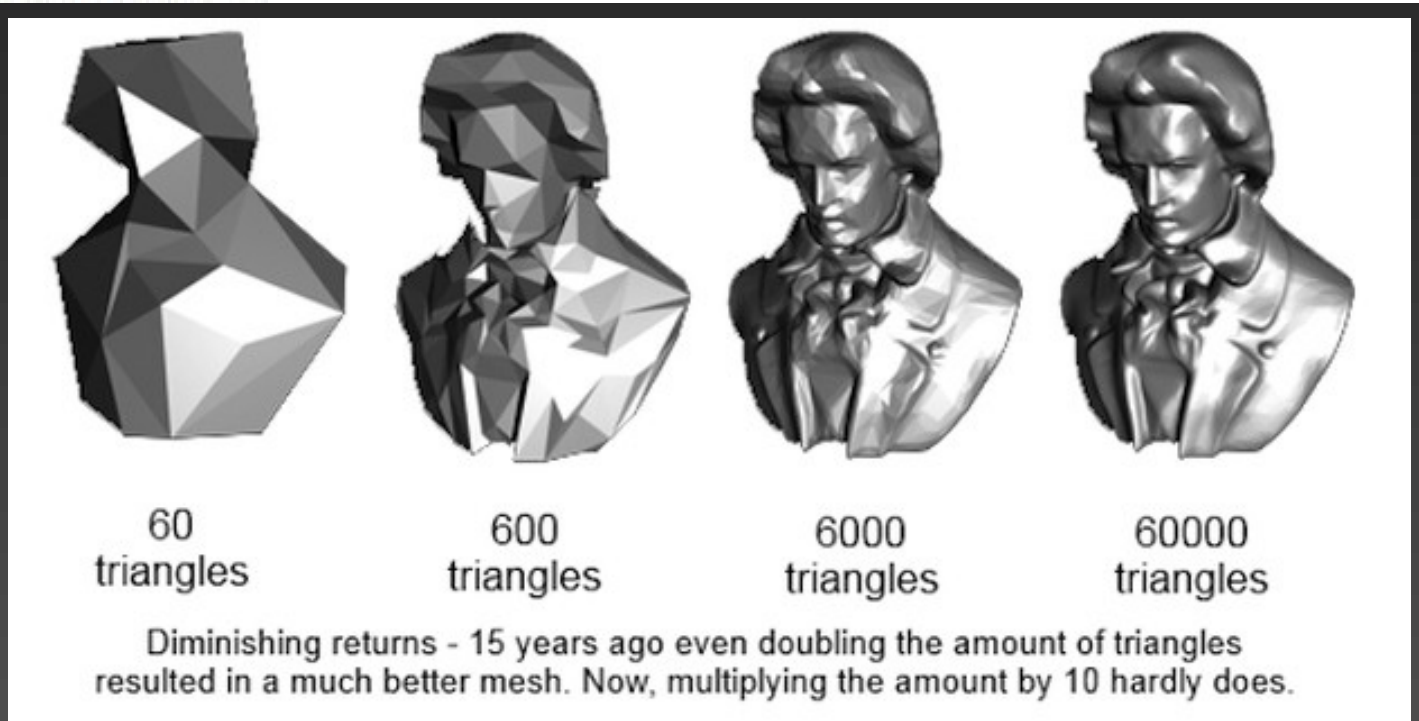
Dělení plošek - teselace



- Několik způsobů
  - Aproximace vs. interpolace
- Dělení nad vertexy
  - Doo-Sabin
- Dělení nad ploškami
  - Catmull-Clark
    - OpenGL + DirectX 11 teselace
  - pracuje s čtyřúhelníkovou sítí (nutná další teselace)
  - náročnější než Doo-Sabin
  - garantuje C1 spojitost (první derivace)

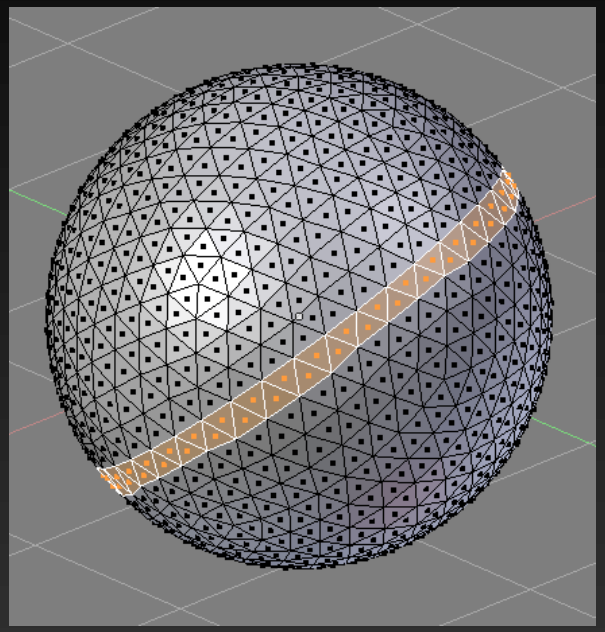
Typické použití

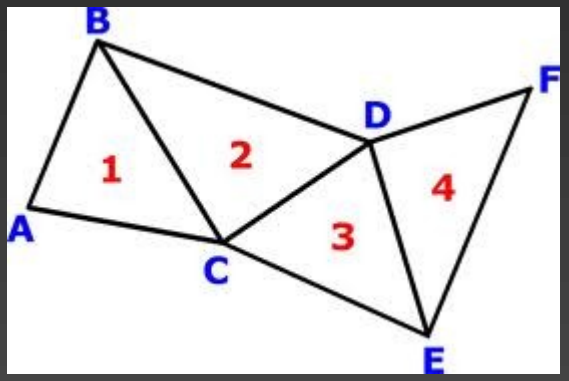




Optimalizace trojúhelníkové sítě

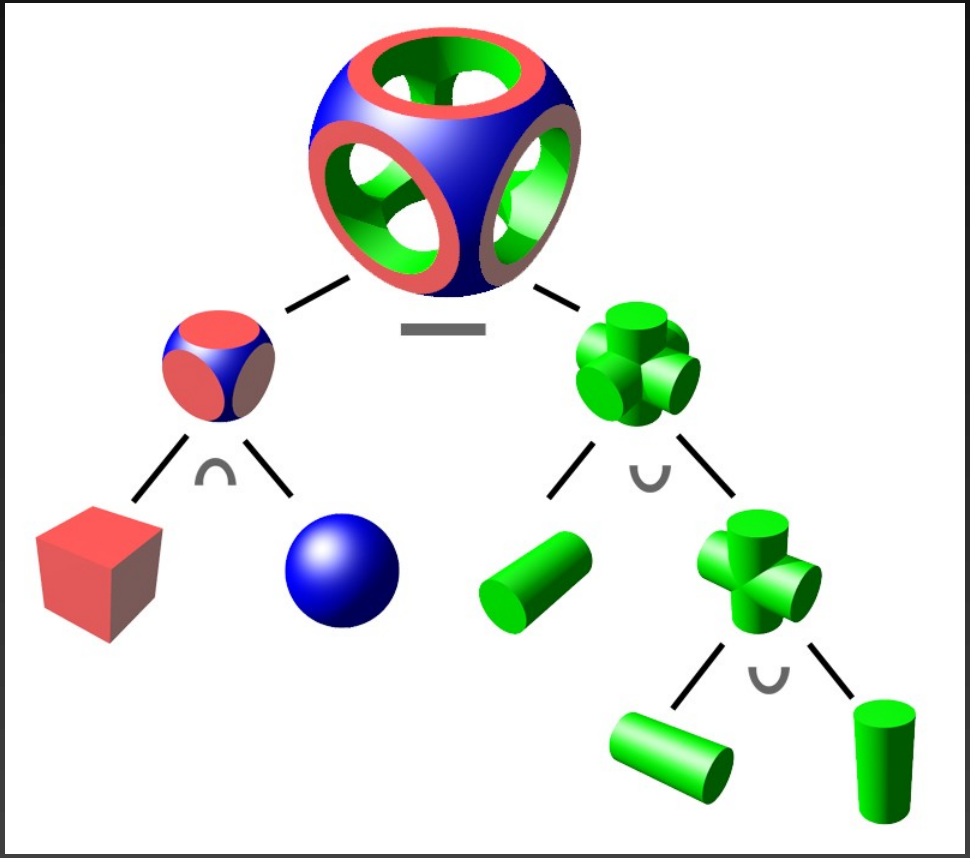
- Pás trojúhelníků (vějíř)
  - přenáší se jen nezbytné informace
  - GPU má HW implementaci → rychlé
  - OpenGL, Direct3D
    - GL_TRIANGLE_STRIP
    - GL_TRIANGLE_FAN





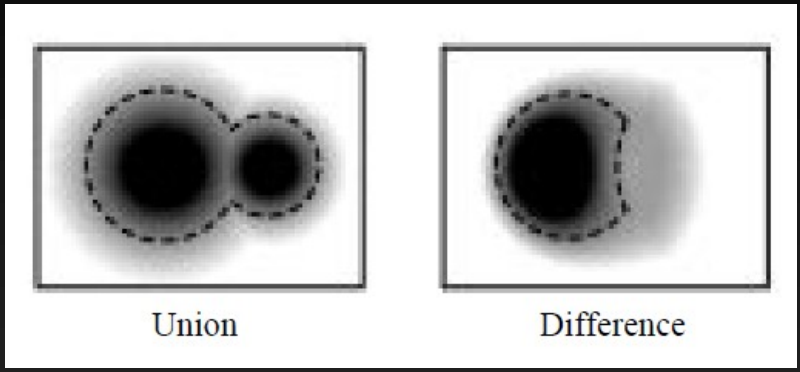
CSG
Konstruktivní geometrie

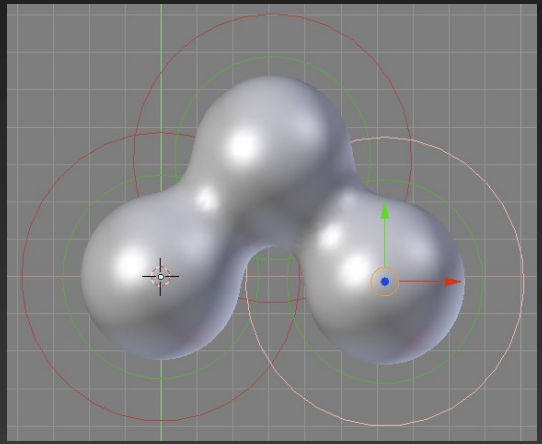
- Výsledek vytvořen pomocí primitiv a booleovských operací
  - krychle, koule, válec, kužel, …
- Před zobrazením obvykle převedeno na trojúhelníkovou síť
- CAD apikace, fyzika (detekce kolizí)

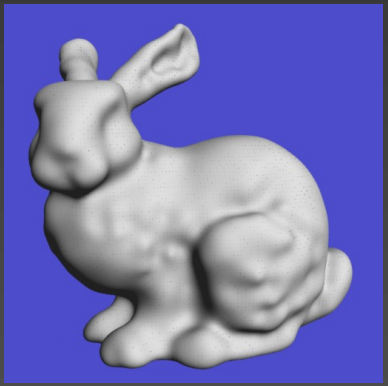


Implicitní plochy

- Obálka vytvořena z primitiv a booleovských operací jako zobrazení pole
  - bod → koule
  - úsečka → cca válec
  - čtverec → cca kvádr
  - …
- Vytváří izoplochu
  - … a převede na trojúhelníky







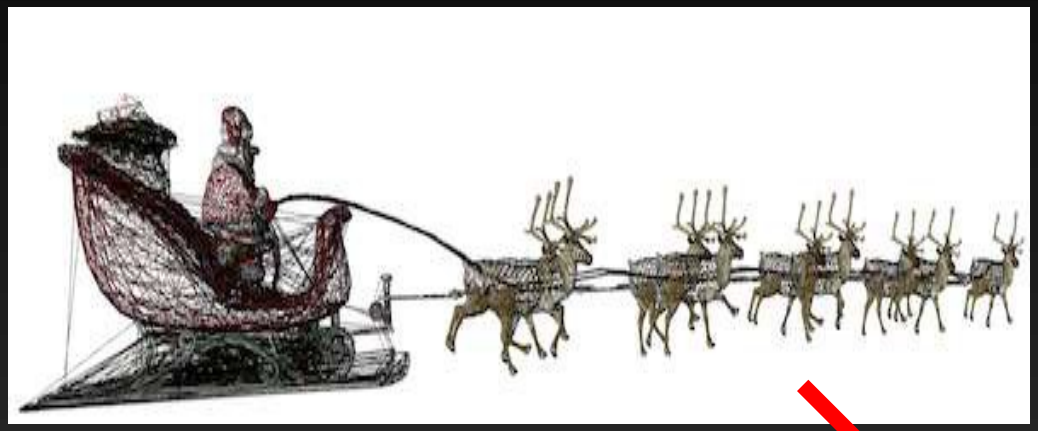
3D obrazové formáty

Ukládání 3D

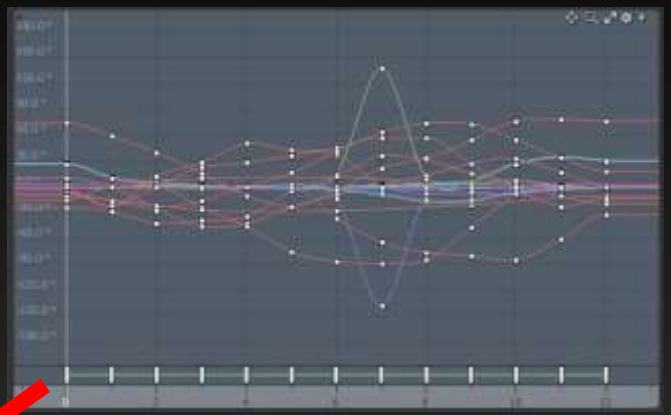
- nejjednodušší = 3D rastr
  - sada 2D rastrových obrázků

- Hraniční reprezentace
  - popis vertexů, hran a trojúhelníkové sítě
    → Přílišná variabilita dat
      → nedostatek rozumných standardů

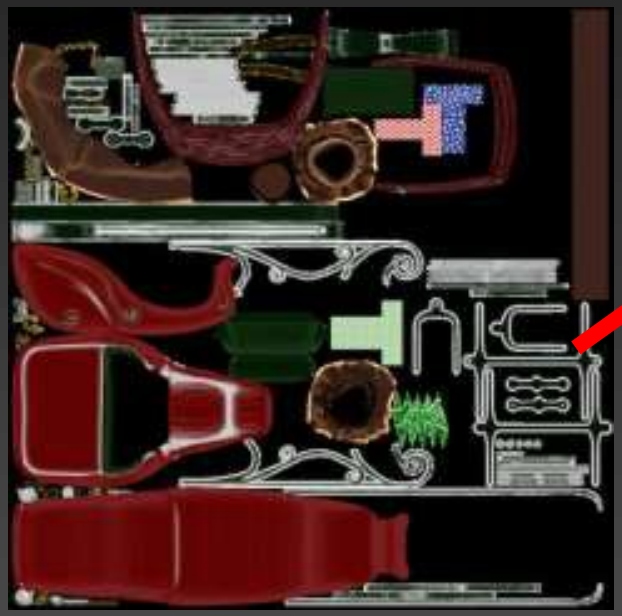
Co potřebujeme pro 3D model (asset)?



Hierarchie scény a geometrie



Animace



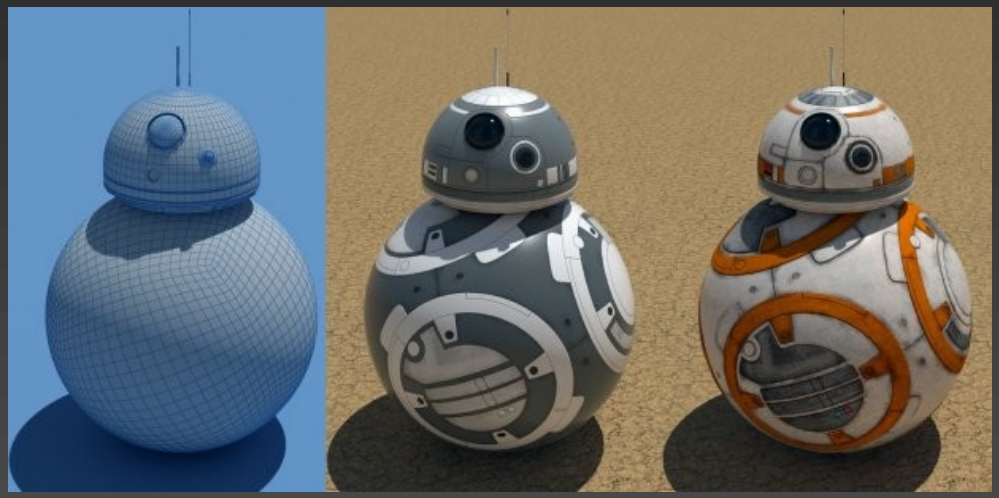
Materiály a textury

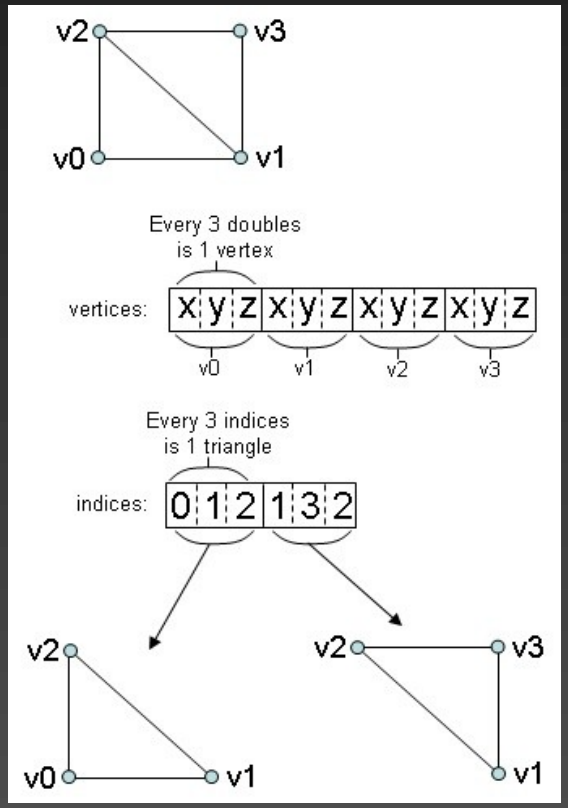
a další...

Výsledný asset ve scéně

Wavefront Object .OBJ
StereoLithography .STL

- Jednoduché textové formáty, běžné, jen základní vlastnosti
- Geometrie
  - vertexy, normály, texturovací koordináty
  - CCW trojúhelníky pomocí indexovaných vertexů
- Materiály i textury uloženy externě
  - .MTL = Material Template Library
  - rastr pro textury (obvykle .TGA = Targa)





Příklad Wavefront OBJ: model krychle

model.OBJ

```
# comment...

# object name
o cube01

# vertex list
v -0.500000 -0.500000 0.500000
v 0.500000 -0.500000 0.500000
v -0.500000 0.500000 0.500000
v 0.500000 0.500000 0.500000
v -0.500000 0.500000 -0.500000
v 0.500000 0.500000 -0.500000
v -0.500000 -0.500000 -0.500000
v 0.500000 -0.500000 -0.500000

# texture coordinate list
vt 0.000000 0.000000
vt 1.000000 0.000000
vt 0.000000 1.000000
vt 1.000000 1.000000

# normal vector list
vn 0.000000 0.000000 1.000000
vn 0.000000 1.000000 0.000000
vn 0.000000 0.000000 -1.000000
vn 0.000000 -1.000000 0.000000
vn 1.000000 0.000000 0.000000
vn -1.000000 0.000000 0.000000

# faces (v/vt/vn)
f 1/1/1 2/2/1 3/3/1
f 3/3/1 2/2/1 4/4/1
f 3/1/2 4/2/2 5/3/2
f 5/3/2 4/2/2 6/4/2
f 5/4/3 6/3/3 7/2/3
f 7/2/3 6/3/3 8/1/3
f 7/1/4 8/2/4 1/3/4
f 1/3/4 8/2/4 2/4/4
f 2/1/5 8/2/5 4/3/5
f 4/3/5 8/2/5 6/4/5
f 7/1/6 1/2/6 5/3/6
f 5/3/6 1/2/6 3/4/6
```

model.MTL

```
# define material
newmtl FrontColor_snowwhite

# ambient color
Ka 0.000000 0.000000 0.000000
# diffuse color
Kd 1.000000 1.000000 1.000000
# specular color
Ks 0.330000 0.330000 0.330000
# specular reflectivity
Ns 10.000

# the ambient texture
map_Ka texture.tga

# the diffuse texture
map_Kd texture.tga

# specular map (texture)
map_Ks specular.tga
```

VRML, X3D

- Virtual Reality Modeling Language
  - zastaralý, ale normovaný formát
  - vhodné pro import-export
- Popis 3D s aktivními i pasivními objekty
  - dynamika pomocí JavaScriptu
- ISO standard
- Textový formát
- Pro web vyžaduje plugin, nepoužívané
- VRML nahrazeno X3D (lepší integrace s XML)

FilmBoX
.FBX

- Proprietární (Autodesk – 3D Studio MAX)
  - poměrně rozšířené, ale všeobecná snaha nahradit
  - SDK zdarma
    - silně restriktivní licence
  - bez dokumentace, časté změny formátu, záměrné znepřehlednění (obfuscation)
  - binární i textová verze

COLLADA .DAE

- COLLAborative Design Activity
- Soudobý kvalitní formát pro editaci a trvalé uložení
- Založeno na XML + komprese
- Spravováno Khronos skupinou – otevřený formát
  - stejně jako OpenGL, OpenCL apod.
- Široká podpora vlastností
  - popis 3D scény, textury, shadery, animace
  - fyzikální vlastnosti (Bullet Physics, PhysX...)
- Široká podpora software
  - Maya, 3DS Max, LightWave 3D, Cinema 4D, Softimage, SketchUp, Blender, Unreal Engine, Google Earth …
- Maximální kvalita, ale nevhodné pro online použití

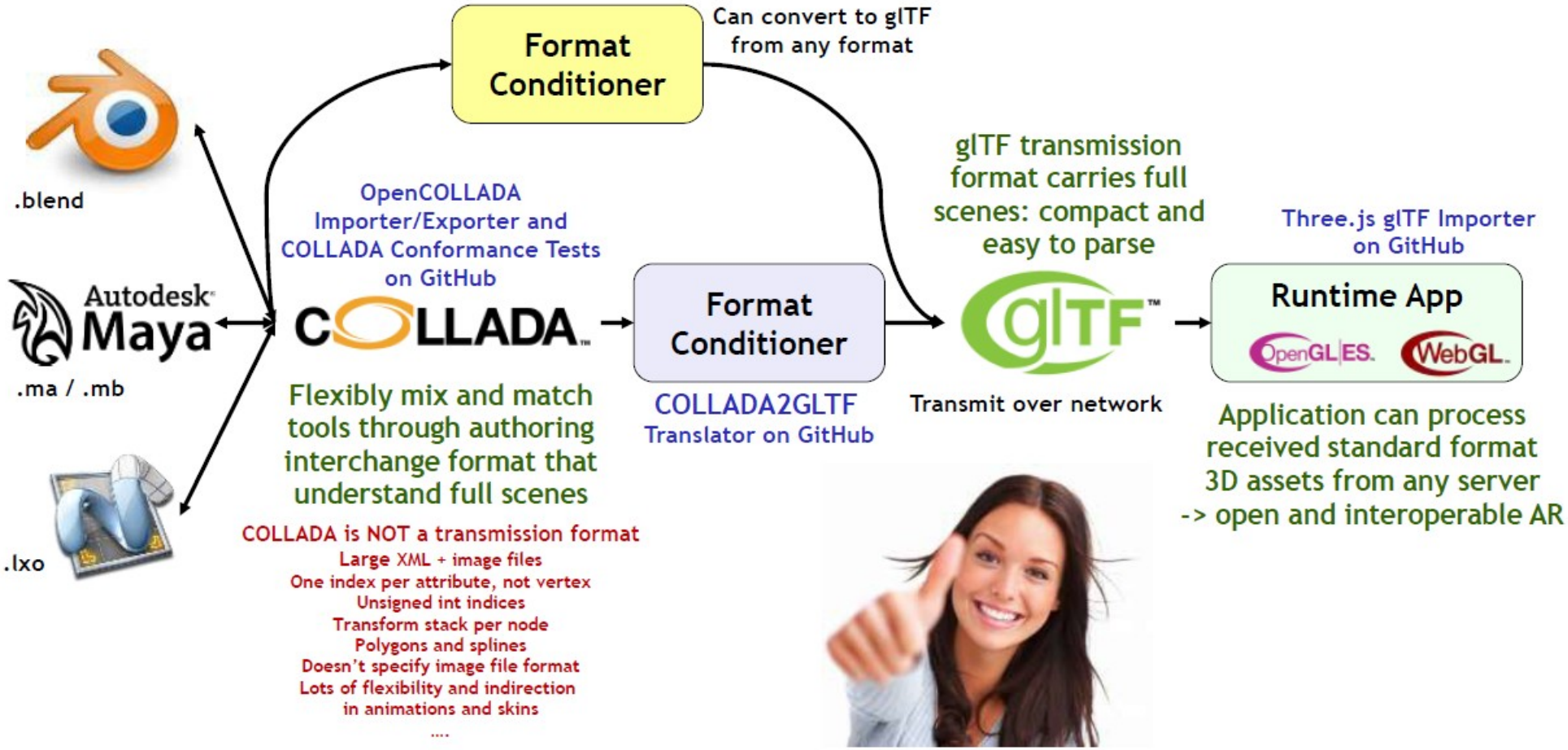
OpenGL Transmission Format glTF

- Bohaté možnosti – jako Collada
  - ale optimalizován pro rychlé načtení a okamžité použití
- Aktuální formát pro přenos a online použití + export
  - online 3D aplikace, 3D na webu, herní engine, …
  - komprimovaný JSON
- Spravováno Khronos skupinou
  - otevřený standard stejně jako Collada, OpenGL, apod.

Audio	Video	Images	3D
MP3	H.264	JPEG	?
napster	YouTube	facebook	!

glTF :)

3D Model Creation and Deployment Standards!



© Copyright Khronos Group 2015 - Page 5

WebGL, WebGPU (APIs, ne formát)

- Spravováno Khronos skupinou
- Založeno na
  - WebGL → OpenGL ES 2.0 (PlayStation 3)
  - WebGPU → Vulkan + Metal + D3D12
- JavaScript based
- Standard pro 3D na webu
  - část specifikace HTML 5
  - není potřeba žádný
  - HW akcelerace
- Podpora ve všech hlavních prohlížečích
  - WebGL = nyní
  - WebGPU = ve vývoji

Příklady modelů

https://free3d.com/3d-models/

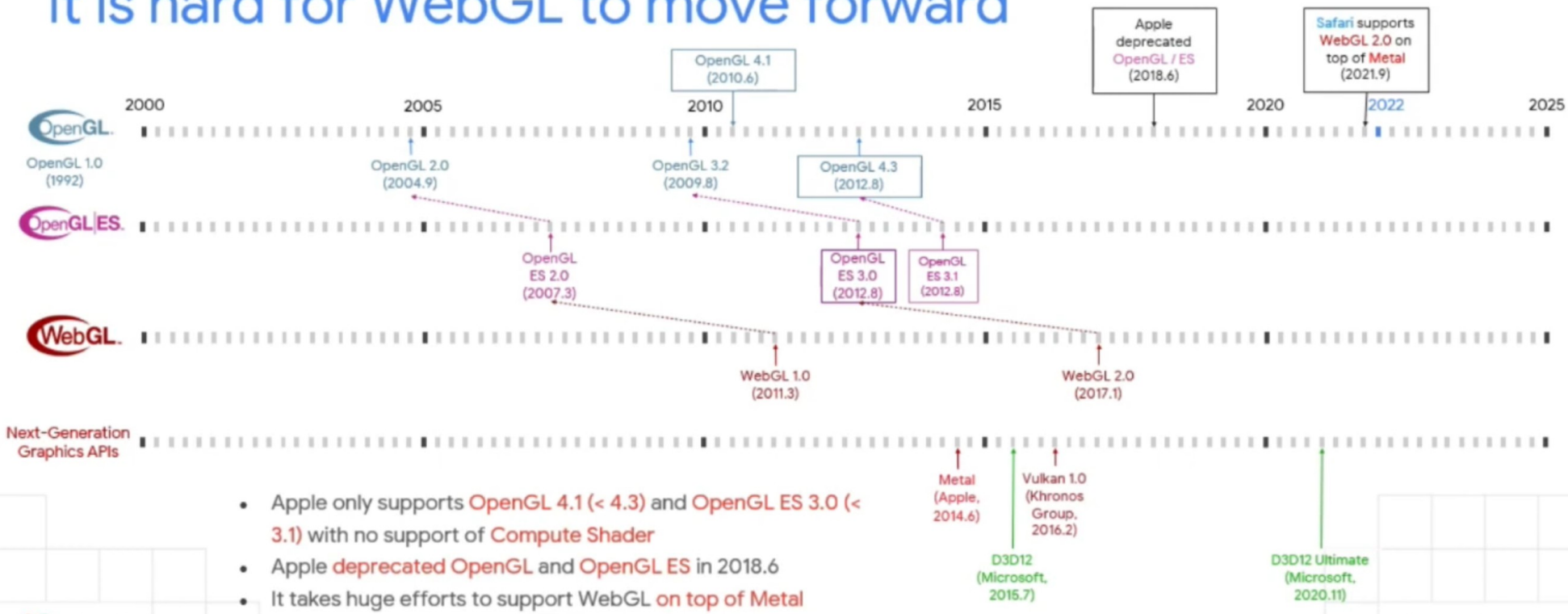
Programování 3D grafiky běžící v reálném čase

3D API

3D API Timeline

WebGL Issues

It is hard for WebGL to move forward



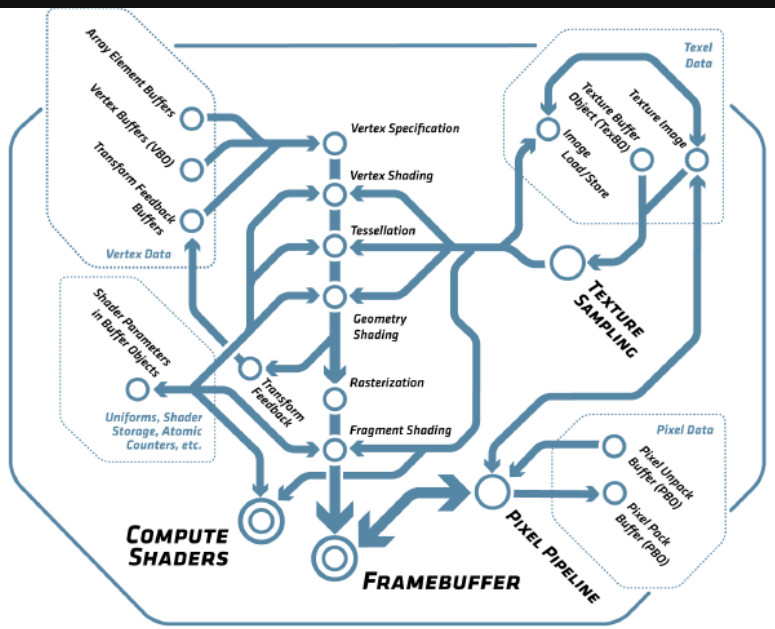
- Apple only supports OpenGL 4.1 (< 4.3) and OpenGL ES 3.0 (< 3.1) with no support of Compute Shader
- Apple deprecated OpenGL and OpenGL ES in 2018.6
- It takes huge efforts to support WebGL on top of Metal
- Microsoft released D3D12 Ultimate in 2020.11

GDG

Google Developers

炜的屏幕共享

OpenGL



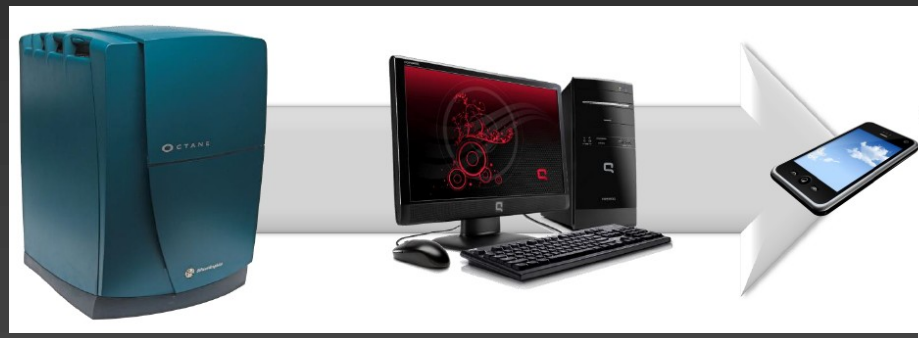
Bringing state-of-the-art functionality to cross-platform graphics

OpenGL 4.6
OpenGL 4.5
OpenGL 4.4
OpenGL 4.3
OpenGL 4.2
OpenGL 4.1
OpenGL 3.3/4.0
OpenGL 3.2
OpenGL 3.1
OpenGL 2.0
OpenGL 2.1
OpenGL 3.0

2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015...2017 ...
DirectX 9.0c		DirectX 10.0		DirectX 10.1		DirectX 11		DirectX 11.1		DirectX 11.2	DirectX 12

OpenGL

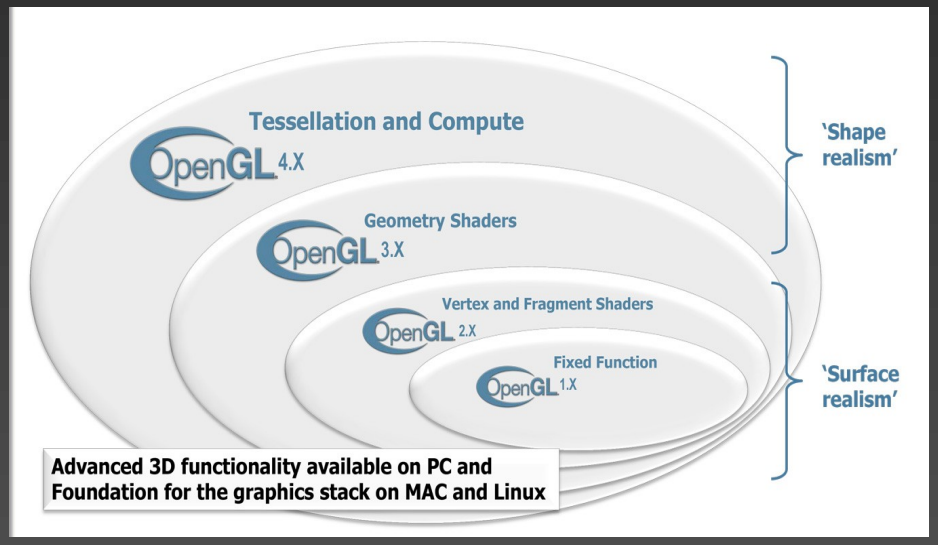
- **Open G**raphics **L**ibrary, knihovna pro tvorbu 2D a 3D grafiky
- Multiplatformní
  - nezávislá na OS, HW, jazyce
    - Win, Linux, OSX, mobily, …
    - C++, Java, .NET, Python, GO, …
- Vznik v Silicon Graphics počátkem 90. let
- Používané verze
  - (1.0 … 1.3), 1.4, (1.5 … 2.0), 2.1, (3.0, 3.1), 3.2, (4.0 … 4.5), 4.6



OpenGL ekosystém

Důležité verze OpenGL

- 1.x … 1.4 – fixed pipeline
  - 1.2 – imaging subset
- 2.x – GLSL – OpenGL Shading Language
  - programovatelné shadery, obdobné C
- 3.x
  - 3.0 – první použití pojmu „deprecated“
    - v podstatě vše 1.x
  - 3.2 – rozdělení na „core“ a „compatibility“
- 4.x – moderní techniky
  - 4.0 – teselace
  - 4.3 – obecné výpočty, OpenGL ES 3.0 kompatibilita



Vlastnosti

- Na různých platformách přibližně stejný výsledek
  - nemusí být bitově shodný
    - ale scéna „vypadá stejně“
  - pro použití loga OpenGL je nutné ověření kvality implementace
- Pouze vykreslování
  - nepodporuje vstup z klávesnice, myši
  - nepodporuje práci s okny
    - platformě závislý kód
- Procedurální vykreslování
  - voláním funkcí („drawcall“) tvoříme scénu
  - skládání primitiv (obvykle trojúhelníky)
- Retained mód
  - data scény uložena předem v GPU
  - vykreslena najednou, nejlépe jediným drawcall → rychlejší
- Vlastní datové typy
  - přenositelnost mezi HW a platformami

Vnitřní stavový automat

- Stavový automat → ~~více vláken~~ 😥
  - nastavíme parametr
    - uloží se do vnitřního stavu
  - provádíme příkazy
    - volba stále aktivní, nemusíme opakovat
  - nastavíme jinou hodnotu...

- C++ aplikace (GL 1.1)

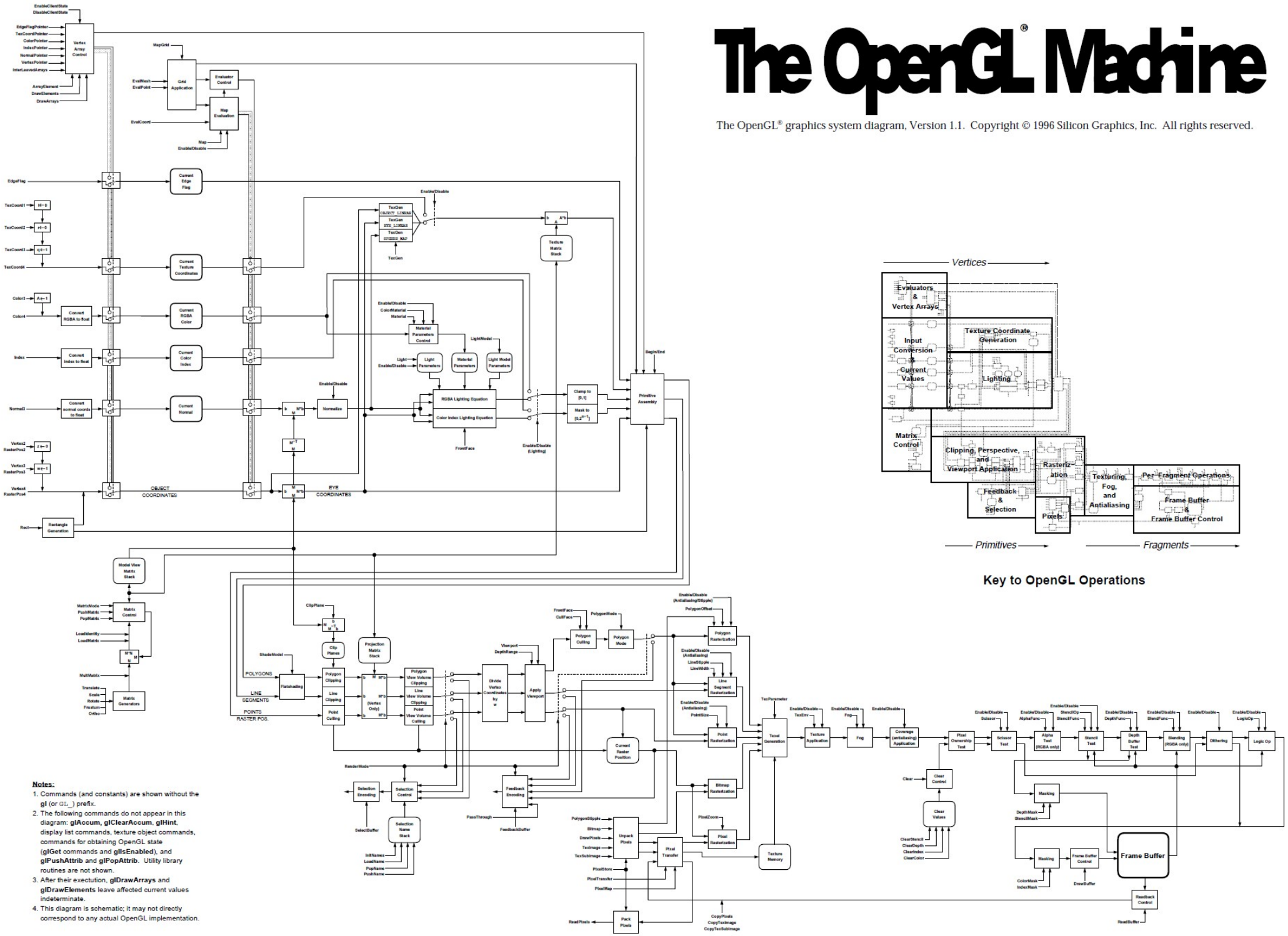
```
glColor4f(R, G, B, A);
glBegin(GL_TRIANGLES);
    glVertex3f(x, y, z);
    glVertex3f(x2, y2, z2);
    glVertex3f(x3, y3, z3);
    //…more vertices…
glEnd();
```

```
class GL_context {
public:
        void glColor4f(GLfloat r, GLfloat g, GLfloat b, GLfloat a)   { current_color = glm::vec4(r,g,b,a); }
        void glBegin(GLenum prim)                                    { current_primitive = prim; }
        void glEnd(void)                                             { current_primitive = GL_NONE; }

        void glVertex4f(GLfloat x, GLfloat y, GLfloat z, GLfloat w) {
                if (current_primitive != GL_NONE) {
                        if (current_primitive == GL_TRIANGLES) {
                                if (cnt < 3)
                                        vert_buff[cnt++] = glm::vec4(x, y, z, w);
                                else {
                                        send_command_to_gpu(this->current_primitive, this->vert_buff, this->current_color, ...);
                                }
                        }
                }
        }
private:
        glm::vec4 current_color;
        GLenum current_primitive;
        glm::vec4 vert_buff[4];
        int cnt = 0;
};
```

The OpenGL® Machine

The OpenGL® graphics system diagram, Version 1.1. Copyright © 1996 Silicon Graphics, Inc. All rights reserved.



Rozšíření pro OpenGL (standardní)

- GLU (OpenGL Utility Library)
  - povinná součást každé OpenGL implementace
  - vytváření matic pohledů
  - teselace, evaluátory NURBS
  - generování UV souřadnic
  - pokročilejší primitiva (koule, válec, apod.)

- dnes se obvykle nepoužívá, nahrazena modernějšími knihovnami
  - GLM

Rozšíření pro OpenGL (od jiných dodavatelů)

- C/C++
  - GLFW (Graphics Library Framework)
    - nezávislé na platformě a jazyku
    - základní interakce s okny, myší atd.
    - jen jednoduché aplikace nebo fullscreen
  - GLEW (OpenGL Extension Wrangler)
    - zpřístupňuje pokročilá GL volání
- C#
  - OpenTK, GLMSharp, …
- SDL (Simple DirectMedia Layer)
  - multiplatformní podpora pro multimédia, periférie, vlákna, apod.
- GLX (UNIX/Linux), WGL (Windows), CGL (Mac)
  - speciality spolupráce s OS (okna, události, myš, klávesnice...)
- irrKlang – audio
- GLUI, GLEE, OpenSceneGraph, …
- GLUT (OpenGL Utility Toolkit)
  - od Khronosu, zastaralé, nepoužívat

https://docs.gl