

# Realtime 3D

## Inleiding

### Korte geschiedenis van 3D engines

Jaren '80:

- ✓ beperkte hardware
- ✓ geen engines → voor elke game werd alle code zelf geschreven
- ✓ later: snelle evolutie van arcade-hardware + in-house game engines

Jaren '90 en '00

- ✓ Eerste 3D games: Doom en Quake
- ✓ Verkoop licenses
- ✓ Licensing model: Quake III & Unreal
- ✓ Engine ↔ Content

Nu

- ✓ Toegankelijker en goedkoper → aantrekkelijk voor independent devs
- ✓ Higher level programmeertalen
- ✓ Cross-platform
- ✓ o.a. Unity, Unreal Engine, CryEngine, Source Engine, RageEngine, Blender, JMonkey3D

### Wat is een 3D engine

- developer focus = highlevel
- een framework (verzameling van componenten/bouwblokken)
  - ✓ **scripting** (game loop; logica van de game/applicatie)
    - talen: C++, C#, Python, Java, Javascript, Lua, ...
    - IDE's: MonoDevelop, Visual Studio, Eclipse, Notepad
  - ✓ **level-editor** (het creëren en aanpassen van levels)
  - ✓ **input** (interactiviteit, o.a. keyboard, muis, joystick, gamepad, touch, leapmotion, kinect)
  - ✓ **graphics**
    - o.a. assets importeren (o.a. 3D models, textures), shaders, materials, lighting & shadows, particles, post processing effects, animation
  - ✓ **physics**
    - o.a. zwaartekracht en andere krachten, collision detection, fluid dynamics, ragdolls
    - physics engines: Havok, PhysX, ODE, Box2D
  - ✓ **audio** (3D positional sound (volume, reverb, distortion), sound effects & sound input)
  - ✓ **network**
    - high-level network programming, geen zorgen maken over zaken als TCP/UDP
    - cloud-based oplossingen zoals photon, Google Play Game Services, etc.
  - ✓ **AI & pathfinding** (nabootsen van intelligentie)
  - ✓ **GUI** (Graphical User Interface)
    - o.a. HUD, knoppen, menu's
    - vaak niet out of the box → plugin-alternatieven beschikbaar
  - ✓ **build** (creëren van executables)
    - exporteren naar verschillende platformen
    - optimalisaties per platform

## Unity

een cross-platform game engine die ontwikkeld werd door Unity Technologies.

- lage leercurve
- veel features
- snelle resultaten
- programmeertaal is C# (lijkt op Java)
- meegeleverde IDE is Monodevelop
- 
- is **component based**:
  - ✓ een project bestaat uit GameObjects
    - component: voegt functionaliteit toe aan GameObjects
    - GameObject: een container voor componenten
      - ↳ elk GameObject heeft ten minste een Transform-component (positie/rotatie/schaal)
  - ✓ voordeel: flexibel!
  - ✓ zelf maken: nieuwe C#-klasse maken en laten overerven van MonoBehaviour
    - Heeft standaard 2 methodes:
      - Start (wordt eenmalig uitgevoerd bij initialisatie)
      - Update (wordt iedere frame uitgevoerd)

## Componenten

- **Transform**: positie, rotatie en schaal van het 3D-object
- **Mesh Filter**: bepaalt de vorm van het 3D-object
  - kan verwijzen naar een 3D-model uit onze assets of een standaard vorm zoals bv. "Cube".
- **Box Collider**: definieert een zogenaamde *bounding box* om te bepalen wanneer een 3D-object kruist met een andere object, o.a. nuttig voor physics.
- **Mesh Renderer**: zorgt ervoor dat ons 3D-object ook effectief op het scherm gerenderd wordt
- **Material**: bepaalt de kleur en enkele basiseigenschappen m.b.t. uiterlijk en belichting

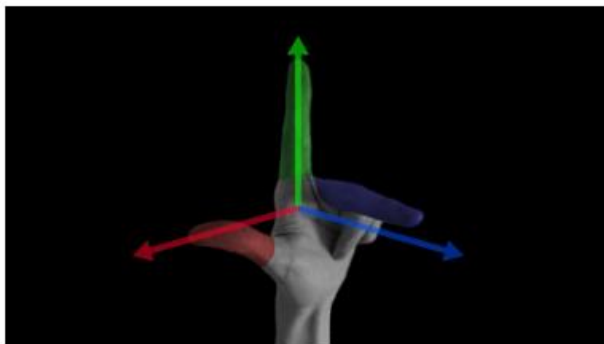
## Mesh

### Coördinatensysteem

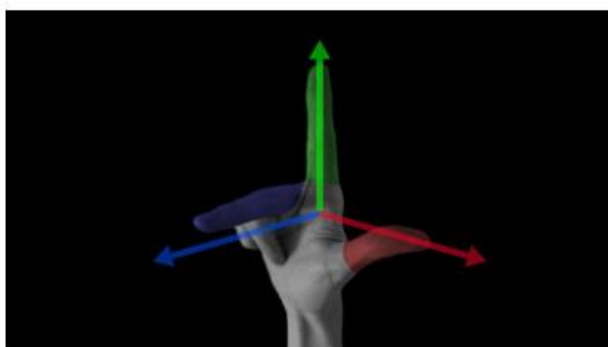
3 richtingen:

- ✓ Links – Rechts (**X = duim**)
- ✓ Boven – Onder (**Y = wijsvinger**)
- ✓ Voor – Achter (**Z = middenvinger**)

Linkshandig



Rechtshandig



Rotatie



## Anatomie van een mesh

**mesh** (een maas):

- in het echt: een maas (een barrière gemaakt van verbonden strengen van metaal, vezels of andere flexibele/kneedbare materialen)
- in 3D computer graphics: een verzameling van vertices, edges en faces die de vorm van een veelhoekig object definiëren

**vertex**: een punt met een bepaalde positie in de 3D-ruimte (X, Y, Z)

- heeft geen dikte, breedte of hoogte
- is niet hetzelfde als vector → een vertex kan extra eigenschappen hebben (kleur, normaalvector, raaklijnvector, UV-coördinaten)

**wireframe**: de weergave van de verbindingen tussen alle vertices

**edge**: een verbinding tussen 2 vertices

- vormt de randen van een vlak (*face*)

**triangle**: een gesloten aaneenschakeling van 3 edges in hetzelfde vlak

- is coplanair (*alle edges liggen op één vlak*)
- de meest eenvoudig mogelijke 3D-vorm

**quad**: een gesloten aaneenschakeling van 4 edges

- niet noodzakelijk coplanair (*alle edges liggen op één vlak*)

**face/polygon/ngon**: een gesloten aaneenschakeling van minimum 3 edges

**triangulatie**: het omvormen van alle polygonen naar triangles

**back-face culling**: een techniek om niet-zichtbare polygonen niet te tekenen

- afhankelijk van de richting van de triangulatie en de positie van de camera

## Vectoren

**vector**: een geometrische waarde met een lengte en een richting

- wordt gevisualiseerd als een pijl van de oorsprong (0,0,0) naar een bepaald punt (x,y,z)
- de positie is niet van belang
- lengte berekenen d.m.v. de stelling van Pythagoras →  $\sqrt{x^2+y^2}$
- richting berekenen d.m.v. goniometrie (tangens) →  $\tan(\alpha) = y / x$

**eenheidsvector**: genormeerde vector waarvan de norm 1 is

- bekomen door de posities van 2 obj. van elkaar af te trekken en te delen door de lengte v.d. vector

## Normaalvectoren

**normaalvector**: een vector die loodrecht staat op een vlak

- belangrijk om lichtinval op vlakken te kunnen berekenen
- bepaalt de hoek van de lichtbron en van de kijker t.o.v. het vlak

**eenheidsnormaalvector**: een vector met de een richting van een normaalvector en lengte 1

## Hard/soft edges

**soft edge:** meerdere vlakken delen dezelfde vertices (*shared vertices*)

- 1 normaalvector per hoek
- goed voor ronde vormen, niet voor hoekige
- de vlakken worden belicht alsof er maar 1 vlak zou zijn

**hard edge:** vertices worden niet gedeeld door meerdere vlakken (*duplicate vertices*)

- 1 vertex en 1 normaalvector per aangrenzend vlak
- Er is een duidelijke scheiding van belichting tussen de 2 vlakken

## Meshmanipulatie

Posities van de vertices in real-time wijzigen is erg CPU-intensief

- vaak beter om shaders te gebruiken

**procedurele generatie:** het genereren van data/content met behulp van een algoritme

**random procedurele generatie:** volledig willekeurige generatie van data

**seeded procedurele generatie:** de data wordt gegenereerd op basis van een seed

- seed: een random gegenereerd getal waarop men zich baseert om de data te genereren
- elke keer je dezelfde seed gebruikt, krijg je dezelfde data

## Transformaties & Physics

### Transformaties

**Transform-component:** het assenstelsel van een GameObject

- Omvat de positie, rotatie en schaal
- Elke spelwereld heeft een default assenstelsel met oorsprong (0,0,0), rotatie (0,0,0) en schaal (1,1,1)

**Hoeken van Euler:** beschrijven de rotatie als een samenstelling van drie rotaties om de coördinaatassen

- Roteren rond de x, y en/of z-as
- Rotatie van 0 – 360°
- Erg goede uitleg van Eulerhoeken en Gimbal locks: <https://youtu.be/zc8b2Jo7mno>

**Gimbal lock:** een probleem dat optreedt bij hoeken van Euler, waarbij 2 van de 3 rotatieassen op hetzelfde vlak komen te liggen, en daardoor een bepaalde rotatieas *gelockt* wordt (er dus niet meer direct rond die as gedraaid kan worden)

**Quaternions:** een alternatief voor hoeken van Euler, om rotaties rond 3 assen voor te stellen

- Heeft naast **x**, **y** en **z** een vierde waarde: **w**
- Voordelen:
  - ✓ geen Gimbal locks
  - ✓ vlotte, directe en consistente interpolatie (tegenover Eulerhoeken)
  - ✓ eenvoudig om berekeningen mee te doen

## Colliders

**collision detection:** berekenen of 2 of meer objecten elkaar raken

- wiskundige raakpunten bepalen op basis van de vorm van objecten
- doel: objecten op elkaar te laten reageren (bv. botsen)
- twee fases:
  1. broad phase: bekijken of er een mogelijke collision is
    - niet gedetailleerd
    - om te vermijden dat er uitgebreide berekeningen gebeuren als de twee objecten niet eens in de buurt van mekaar liggen
  2. narrow phase: de effectieve, precieze collision berekenen

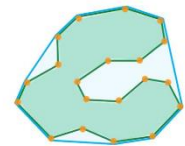
**collider:** een geometrische vorm die gebruikt wordt om collision detection te berekenen tussen objecten

**primitive colliders:** colliders op basis van eenvoudige geometrische figuren (o.a. box, sphere, capsule)

**compound colliders:** een samenstelling van *primitive colliders* om meer complexe vormen te dekken

**mesh colliders:** de volledige wireframe van de mesh wordt gebruikt om de collision te testen

- 2 soorten:
  - ↳ bolle mesh colliders (*convex*, vereisen het minste rekenkracht)
  - ↳ holle mesh colliders (*concave*)
- convex hull: holle objecten sneller berekenen → omhullen in een bolle vorm (vereenvoudigde weergave, dus kan zorgen voor ongewenste effecten)
- convex decomposition: opdelen in meerdere bolle vormen → nauwkeuriger



**simplified mesh colliders:** een vereenvoudigde versie van de mesh wordt gebruikt om de collision te testen

## Physics

**physics:** simulatie van de wetten van de fysica

- vereenvoudiging van de werkelijkheid

**rigid body:** een hard, niet vervormbaar object

- er kunnen krachten op uitgeoefend worden
- kunnen met elkaar botsen
- gemaakt van een fysisch materiaal

## Krachten

**friction force** (frictie): kracht die ontstaat wanneer 2 objecten langs elkaar schuiven

- hoeveelheid wrijving hangt af van de ruwheid van de oppervlakken
- zorgt voor vertraging → brengt bewegende objecten tot stilstand
- aanpassen in Unity door een Physic Material te creëren en toe te wijzen aan een collider component van een GameObject

**static friction force:** de wrijvingskracht tussen 2 stilstaande objecten

- deze kracht moet overwonnen worden om een object in beweging te krijgen

**dynamic friction force:** de wrijvingskracht tussen 2 objecten, waarvan er minstens 1 beweegt

- deze kracht moet overwonnen worden om een object in beweging te houden
- kleiner dan de static friction force

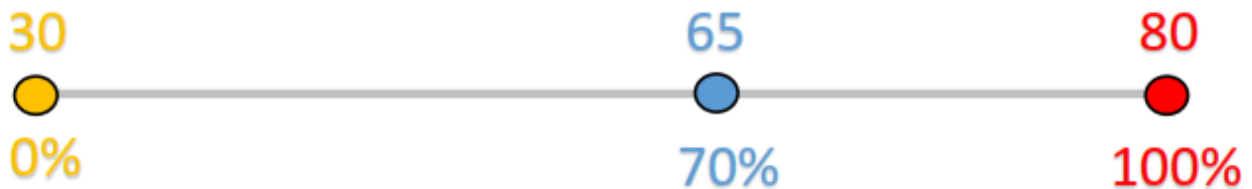
## Animation

**animatie:** de illusie van beweging door het na elkaar afspelen van verschillende stilstaande beelden, zogenaamde frames

## Interpolatie

**interpolatie:** de onbekende waarde bepalen tussen 2 gekende waardes, op basis van een percentage

**lerp** (*linear interpolation*): elke frame verplaatst het object een bepaald percentage van de volledige afstand

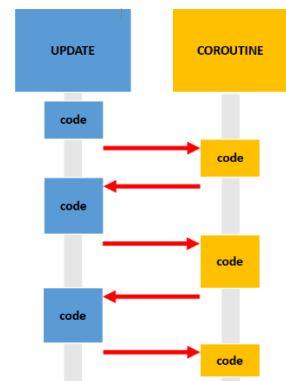


## Coroutines

**coroutine:** een IEnumerator die toelaat om code te schrijven buiten de Update-methode, die ook elke frame wordt uitgevoerd

- laat toe iteratiestructuren te gebruiken die elke frame gepauzeerd worden, zodat de volgende frame berekend kan worden (*cooperative multitasking*)

**cooperative multitasking:** het uitvoeren van code wordt afgewisseld tussen verschillende processen (routines), om de Update-methode niet te zwaar te belasten en de framerate hoog te houden



## Tweening

**tweening** (*in between*): automatisch animeren tussen twee waarden.

## Model animations (Mecanim)

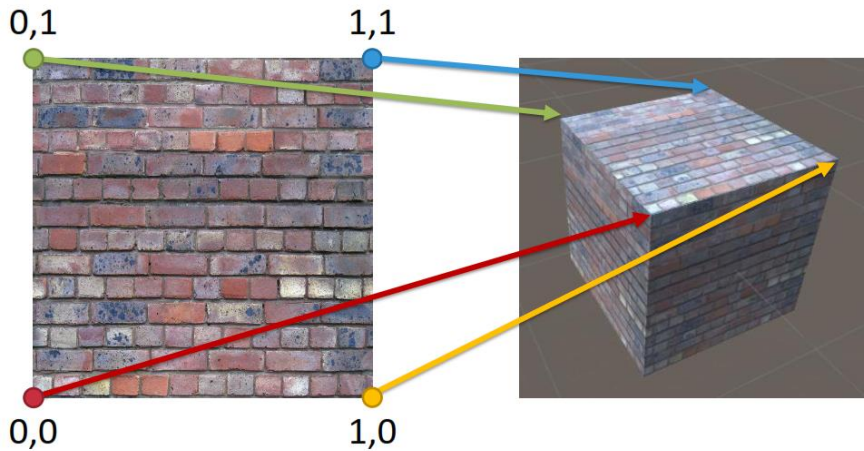
**in place motion:** de animatie verplaatst het object niet, m.a.w. het object blijft *in place*

**root motion:** de verplaatsing (*translate*) gebeurt door de animatie zelf

**Mecanim:** een animatiesysteem meegeleverd met Unity

## UV-mapping

**UV-mapping:** 2D textures mappen op een 3D-object op basis van vertices



## Textures

**POT-texture:** een texture waarvan de resolutie vierkantig en een macht van twee is

→ 2x2, 4x4, 8x8, 16x16, 32x32, 64x64, 128x128, 256x256, 512x512, 1024x1024, 2056x2056, 4096x4096

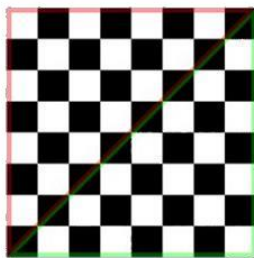
**NPOT-texture:** een texture van eender welk formaat

- minder optimalisatie → minder performant
- niet ondersteund door oudere hardware

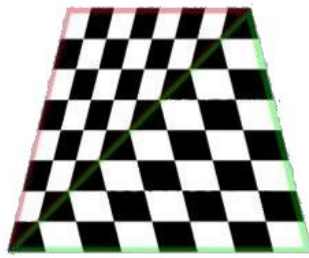
**affine texture mapping:** coördinaten worden lineair geïnterpoleerd over een vlak, per triangle

**perspective correct texture mapping:** coördinaten worden berekend t.o.v. de kijkhoek

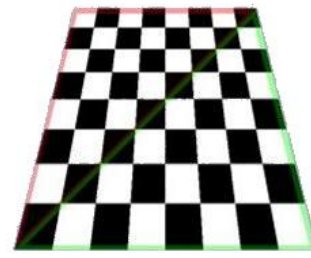
- trager, maar correcter



flat mapping



affine mapping



correct mapping

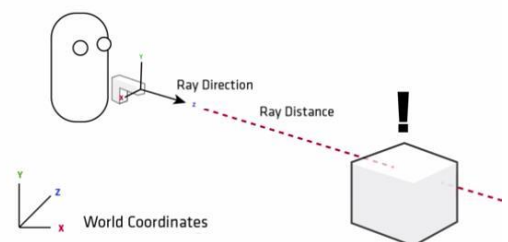
## Vertex colors

Iedere vertex heeft één kleur, maar kleuren kunnen worden geïnterpoleerd tussen vertices

## Raycasting

**raycasting:** een straal tekenen vanuit een bepaald punt, in een bepaalde richting

- met als doel een raakpunt tussen een lijn en een vlak/object te bepalen
- m.b.v. een vector, het bereik is de lengte van de vector





## Camera

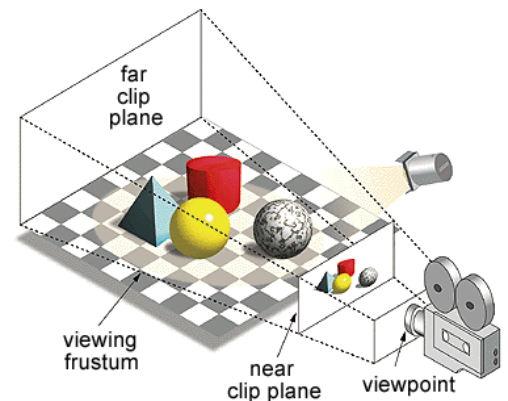
**viewpoint:** het standpunt van de camera

**viewing frustum:** het deel van de wereld die op beeld zichtbaar is

- alles tussen de near en far clipping pane
- zelfde als de *field of view* van de gewone camera

**near clipping plane:** alles wat dichterbij de viewpoint dan de near clip plane, wordt niet getoond

**far clipping plane:** alles wat verder is dan de far clip plane, wordt niet getoond



**raytracing:** een 3D-scene wordt *gefotografeerd*, met als doel een 2D afbeelding te verkrijgen.

- het 2D-beeld wordt pixel per pixel opgebouwd
- minder geschikt voor realtime 3D

## Model selection & performance

Eigenschappen van 3D-modellen die de performance beïnvloeden

- aantal vertices
- hard/soft edges
- aantal triangles
  - mobiel: best tussen 300 – 1.500
  - low-end: best tussen 500 – 20.000
  - high-end: best tussen 20.000 – 100.000
  - next-gen: best tussen 100.000 – 500.000
- aantal materials
- grootte/kwaliteit van textures
- LOD (level of detail)
- Shaders

## CPU ↔ GPU

**CPU:** doet complexe, eenvoudige berekeningen relatief traag

- berekent o.a. game logic, lichtinval, voorbereiding van shaders, communicatie naar GPU
- aantal objecten is belangrijk, aantal triangles minder

**GPU:** doet meerdere eenvoudige berekeningen tegelijk en snel

- ieder object wordt naar de GPU gestuurd
- meerdere malen per material en per real-time licht

## Performantie

**draw calls:** een vraag van de engine naar de graphics API (bv. OpenGL, Direct3D) om een object te renderen

- aantal draw calls = aantal objecten die gerenderd worden (zo laag mogelijk houden)

**draw call batching:** het aantal draw calls verminderen door

- niet-bewegende objecten samen te voegen tot één grote mesh (static batching)
- bewegende meshes die klein genoeg zijn transformeren op de CPU, en gelijkaardige resultaten combineren tot één grote mesh (dynamic batching)
- objecten moeten hetzelfde material hebben

**LOD (*level of detail*):** efficiënter renderen door het verlagen van de kwaliteit van objecten door vertextransformaties, als het object ver van de camera is, van lagere prioriteit is, etc.

- verschillende versies van een model worden voorzien, met verschillende *levels of detail*

**object pooling:** een techniek (of design pattern) waarbij een aantal objecten geïnitieerd worden buiten het zicht van de camera om deze daarna te kunnen gebruiken wanneer ze nodig zijn

- een nieuw object moet zo niet telkens gecreëerd en vernietigd worden
- heel wat rekenkracht wordt uitgespaard

**culling:** een techniek die ervoor zorgt dat objecten die buiten het gezichtsveld van de camera liggen niet gerenderd worden

- zorgt voor een lagere GPU-belasting
- bv.

**frustrum culling:** het weglaten van objecten die zich niet in het frustrum van de camera bevinden

- wordt automatisch gedaan door Unity

**occlusion culling:** het weglaten van objecten die niet zichtbaar zijn doordat één of meerdere andere objecten in de weg staan

- moet manueel geactiveerd worden in Unity door een occlusion map te *baken*

**mipmapping:** kleinere resolutie textures gebruiken voor kleinere triangles

- minder data om te versturen naar de GPU

## Normal mapping & lighting

### Lighting

#### licht:

- in het echt: een combinatie van deeltjes (*photons*) en golven (*waves*)
- in 3D computer graphics: rays; vectoren met een richting en sterkte

**ambient lighting**: het licht komt gelijkmatig uit alle richtingen (omgevingslicht)

- er is geen directe lichtbron

**diffuse lighting**: het object weerkaatst het licht van één of meerdere lichtbronnen in verschillende richtingen

- bij ruwe oppervlakken

**specular lighting**: het object weerkaatst het licht van één of meerdere lichtbronnen in één richting

- bij gladde oppervlakken
- geeft een glazend effect

### Soorten lichtbronnen

**directional light**: lichtstralen gaan maar in één richting, over de hele scène

- de positie van de lichtbron is niet belangrijk, enkel de rotatie
- bv. de zon

**point light**: lichtbron zendt uit in alle richtingen

- de intensiteit verlaagt naargelang de afstand van de bron
- alles buiten de range ontvangt geen licht

**spotlight**: de lichtbron zendt uit binnen een bepaalde hoek

- bv. een zaklamp, autolichten

**area light**: de lichtbron zendt uit in alle richtingen van 1 kant van een voorgedefinieerde rechthoek

- realistischer dan een spotlight, maar veel minder performant
- niet at runtime, enkel prerender (baking)

### Soorten technieken

**cookie**: een schaduw in de vorm van een texture → veel performanter dan schaduwen te berekenen

**global illumination**: meest realistisch mogelijke simulatie van belichting

- beste techniek = raytracing
- niet performant genoeg voor realtime toepassingen → allerlei trucs toepassen om het resultaat te benaderen

**ambient occlusion**: vanuit ieder punt op het model een groot aantal rays casten in alle richtingen

- Als de ray een ander object of deel van hetzelfde object raakt → minder lichtinval van de omgeving

**Screen Space Ambient Occlusion (SSAO)**: iedere frame de ambient occlusion berekenen op basis van gerenderde objecten

- ook bewegende objecten!
- minder accuraat dan AO-map

**light probes:** bewegende objecten ook ambient light laten ontvangen

→ minder accuraat dan AO-map

**reflection probes:** spiegeling tonen op glanzende objecten

### Normal mapping

**light maps:** vooraf berekenen van statische belichting

→ Geen realtime berekeningen nodig → veel performanter

→ Gebeurt automatisch in Unity voor statische objecten

**bump maps:** reliëf simuleren a.d.h.v. textures i.p.v. geometrie

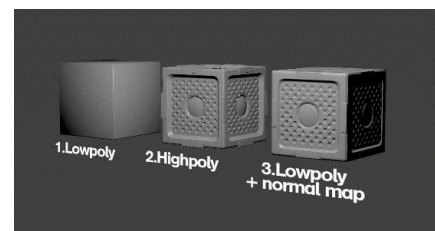
→ bevat hoogteinformatie: hoe witter, hoe hoger, hoe zwarter, hoe lager

→ het contrast bepaalt de sterkte

**normal maps:** bevat hoogteinformatie en richting/kanteling

→ zorgt voor realistischere belichting

→ verkregen door een high poly model te *baken* op een low poly model



**retopologizing:** het omzetten van een model met veel polygonen (vaak gemaakt door sculpting) naar een model met minder polygonen, geschikt voor gebruik in realtime toepassingen