
Grafica Computerizzata
Corso di Laurea in Informatica
Docente: Giovanni Di Domenico

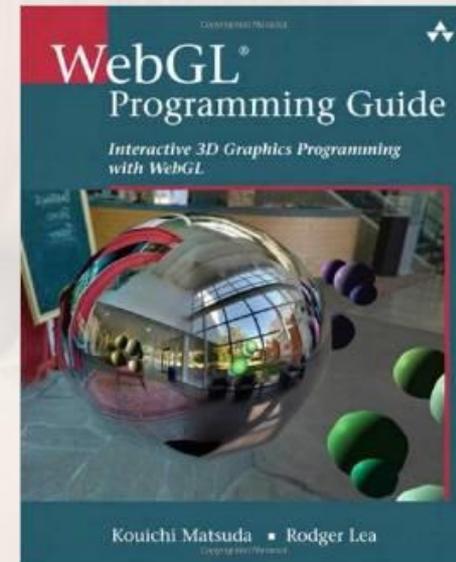
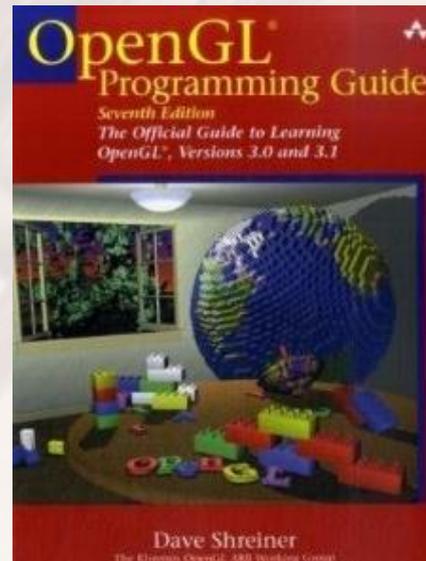
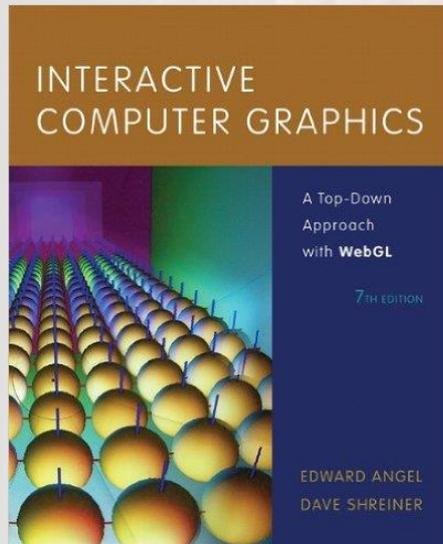
Applicazioni della CG

Informazioni sul corso

- Orari:
 - Lunedì 11:30 - 13:30
 - Giovedì 11:30 - 13:30
- Aula: Laboratorio Info 2- Blocco F
- Materiale del corso:
 - <http://www.fe.infn.it/~didomeni/CG2018>
- Per contattare il docente: didomenico@fe.infn.it

Informazioni sul Corso

- Libri di testo:



- **Interactive Computer Graphics: a Top-Down approach using WebGL.** E. Angel & D. Shreiner, Prentice Hall College Div. - Seventh Edition (2014).
- OpenGL programming Guide 8th edition. Addison Wesley (2013)
- **WebGL Programming Guide: Interactive 3D Graphics Programming with WebGL.** K. Matsuda, R. Lea. Addison Wesley (2013)

Argomenti del Corso - 1

- Modelli e Sistemi Grafici
- La libreria OpenGL/WebGL
- Programmazione Grafica
 - Primitive grafiche
 - Attributi primitive grafiche
- Trasformazioni Spaziali
 - Rotazione, traslazione,... 2D
 - Rotazione, traslazione,... 3D
- Proiezioni e gestione della camera
- Rappresentazione di oggetti 3D
- Modelli di Illuminazione e metodi di rendering
- Input interattivo e GUI

Argomenti del Corso - 2

- Tecniche di clipping e rasterization di primitive, rimozione delle superfici nascoste;
- Texture mapping;
- Cenni di programmazione degli shader;
- Sistemi di particelle;
- Rappresentazione di curve e superfici

Modalità d'esame

- Prove di programmazione assegnate durante il corso (1/4)
 - Verranno assegnati degli esercizi da svolgere individualmente e da consegnare entro una data stabilita.
- Progetto finale da svolgere in gruppo (2-3 persone) (1/4)
- Prova orale (1/2)
 - Domande sugli argomenti del corso svolti a lezione

Che cosa è la Computer Grafica

- La disciplina che studia i metodi per realizzare immagini di sintesi, impiegando opportuni algoritmi, strutture dati innovative ed il supporto di hardware dedicato.
- Le immagini di sintesi possono essere singole o succedersi in un'animazione.
- *“Computer graphics is a sub-field of computer science which studies methods for digitally synthesizing and manipulating visual content. Although the term often refers to the study of three-dimensional computer graphics, it also encompasses two-dimensional graphics and image processing.”* (wikipedia)

Nascita della Computer Graphics

- Immediatamente dopo la nascita dei computer, per la necessità di definire i formalismi con cui rappresentare, in modo visuale, i dati numerici generati dai computer.
- Nei primi stadi di evoluzione, per motivi tecnologici, le informazioni si rappresentavano solo su supporti statici (carta disegnata con plotter).
- In seguito ha prevalso largamente la rappresentazione su supporti dinamici (schermi di tipo televisivo).

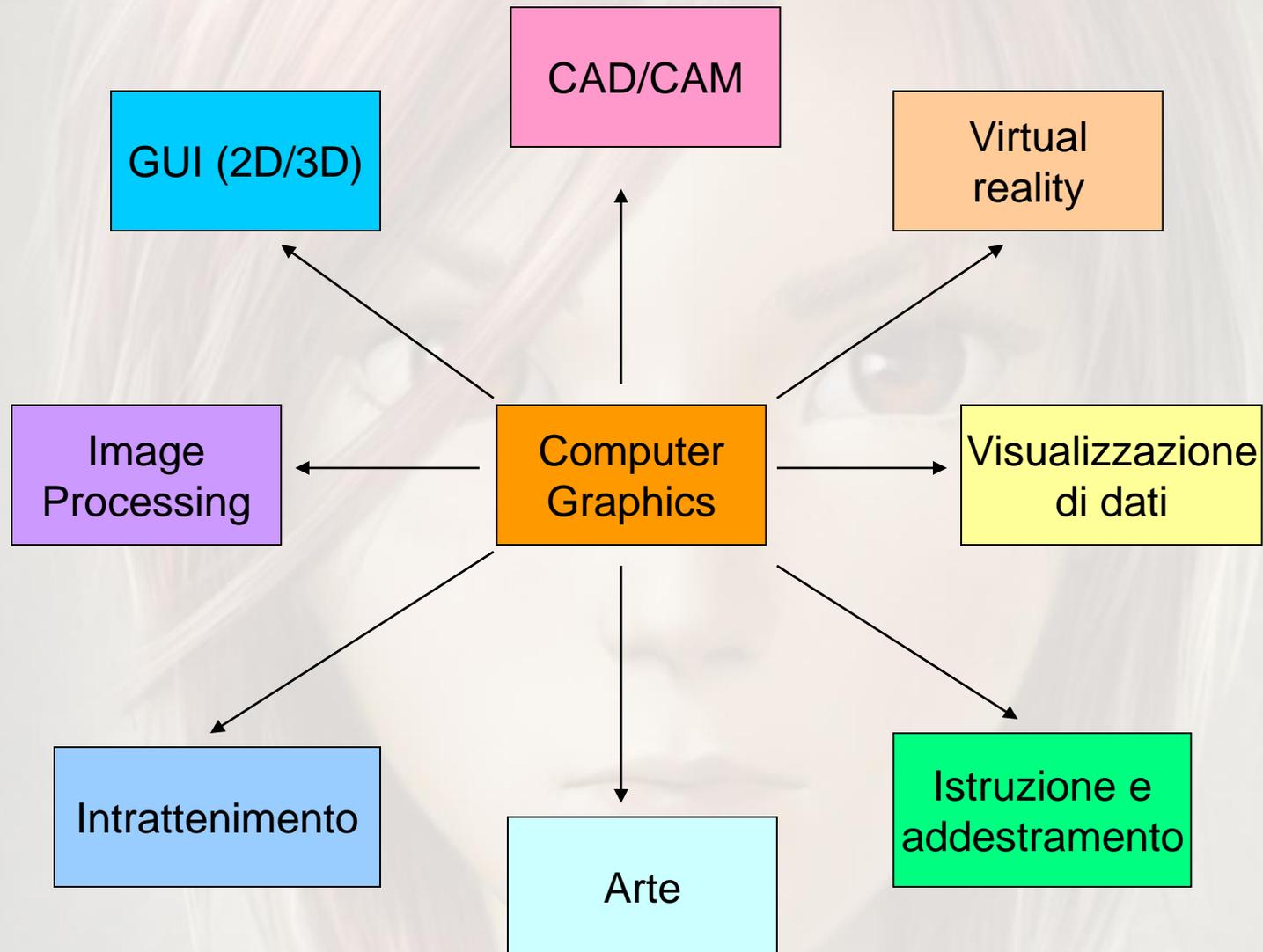
Come evolve la Computer Graphics

- La computer graphics oggi è praticamente solo interattiva.
- Deve riuscire a modellare un contesto in cui l'utente del sistema ha il controllo continuo sul contenuto, l'aspetto e la struttura degli oggetti e sulla maniera con cui vengono rappresentati, tramite l'utilizzo dei dispositivi di input.

Utilizzabilità della CG

- Fino agli anni '80 l'utilizzo di strumenti di computer graphics era limitato ad un numero ristretto di studiosi a causa dell'alto costo delle attrezzature necessarie
- (~ centinaia k-euro).
- L'introduzione del personal computer con grafica raster incorporata ha reso accessibile a basso costo l'uso di grafica sofisticata (~ centinaia euro).

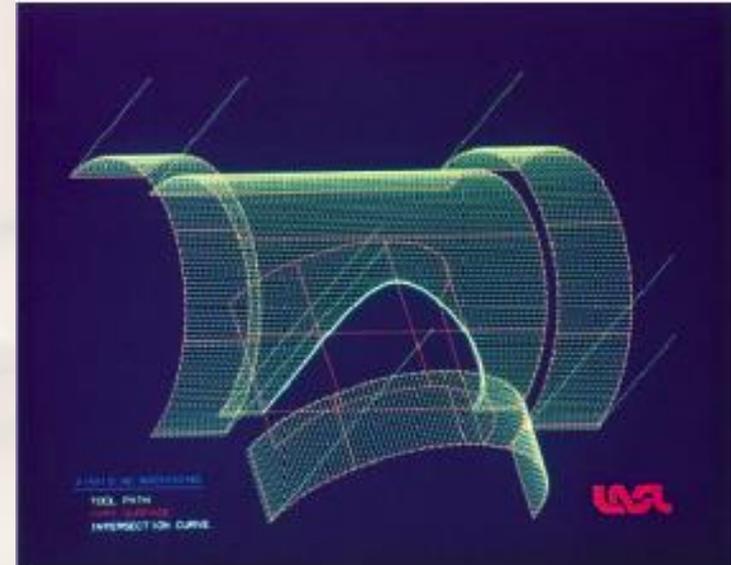
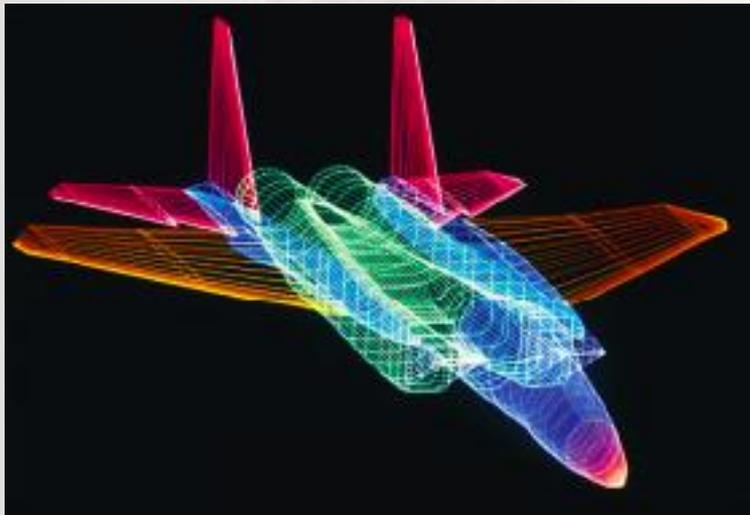
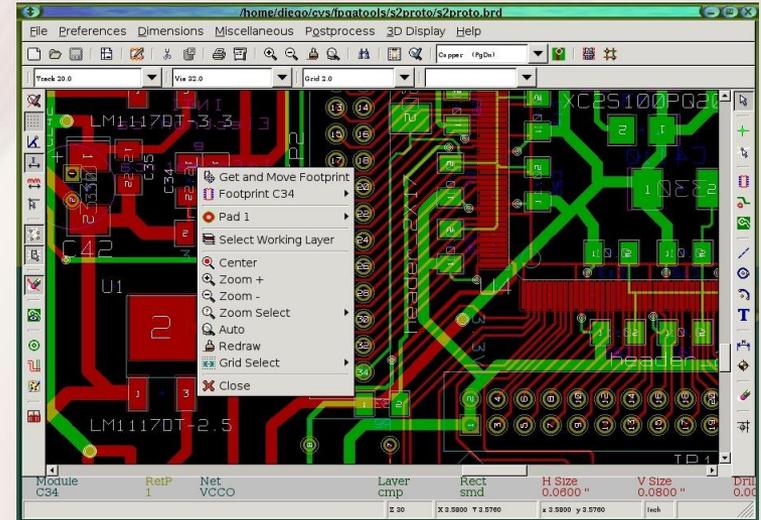
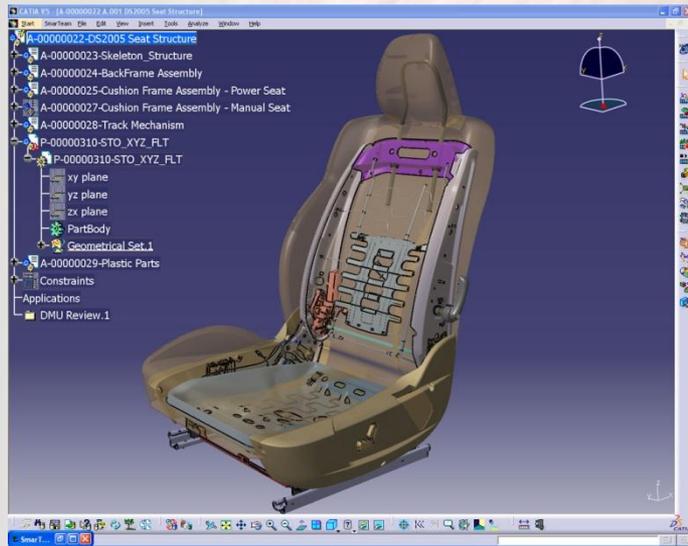
Applicazioni odierne della CG



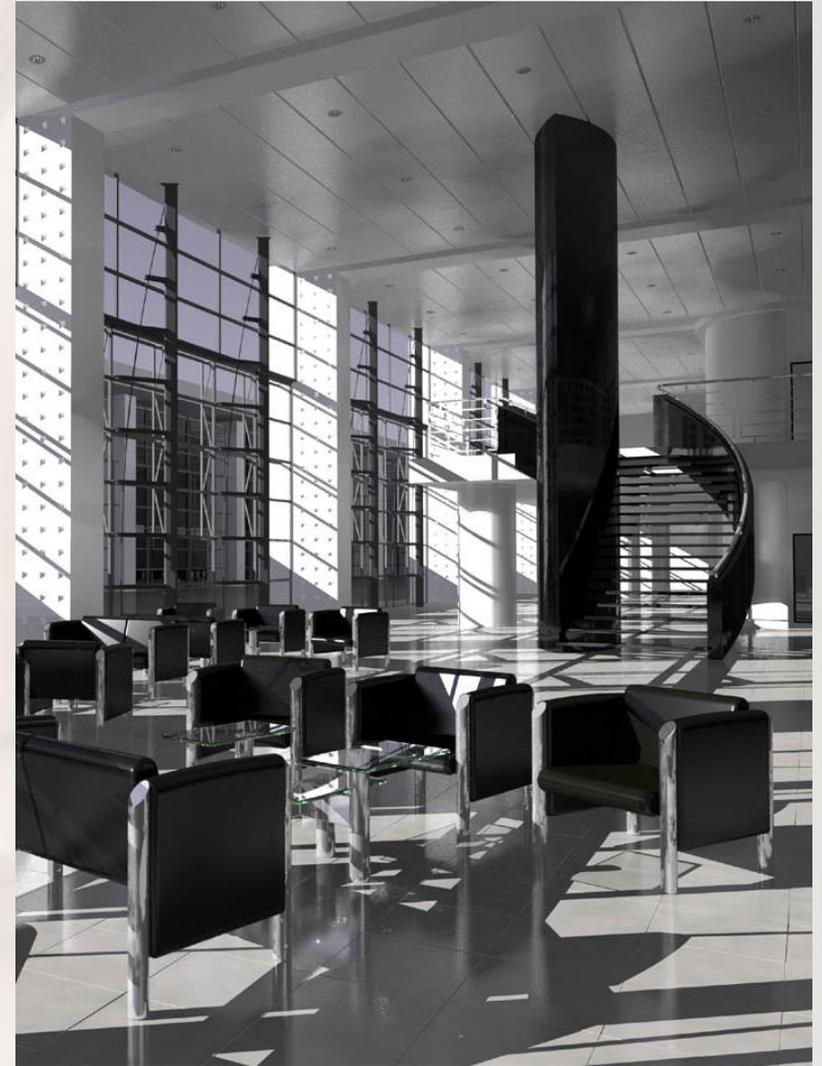
Computer Aided Design (CAD/CAM)

- Progettare componenti e sistemi di vario tipo; dai componenti meccanici, elettrici ed elettronici, alle strutture architettoniche, auti, circuiti VLSI e reti di telecomunicazione.
- Durante la fase di progettazione si può anche interagire con il modello per verificarne le caratteristiche (simulare la resistenza strutturale di un pezzo meccanico in condizioni limite).
- Il sistema supporta il progettista nelle sue scelte sulla base dei risultati di prove simulate.
- Progettazione e definizione del processo di produzione: procedure per macchine a controllo numerico.

Computer Aided Design (CAD)



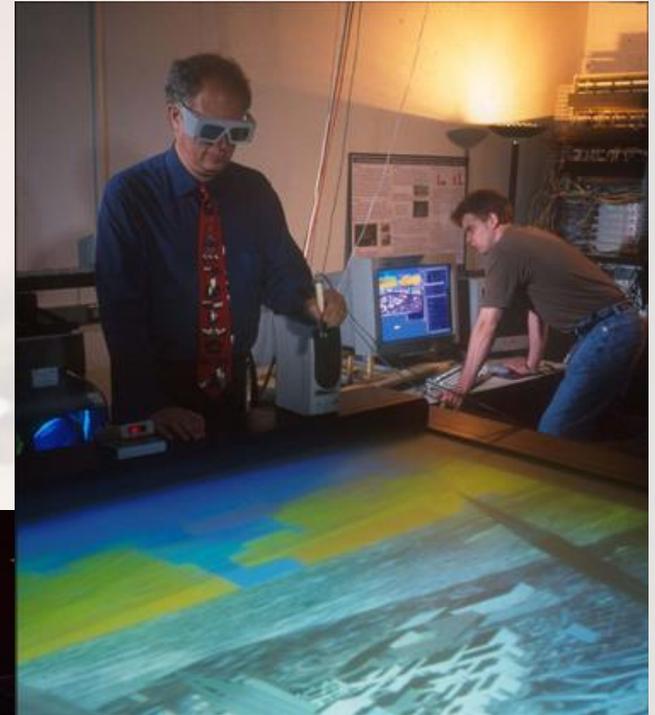
Architettura



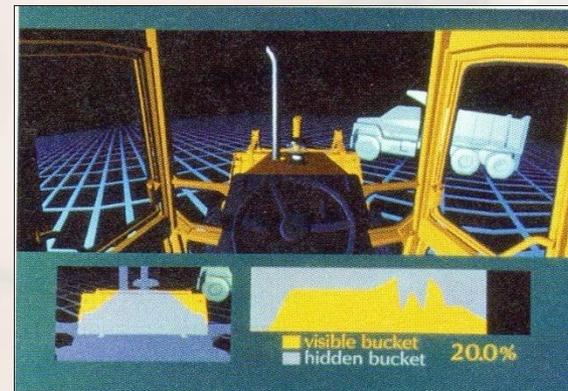
Realtà Virtuale

- Per **realtà virtuale** si intende l'insieme di tecniche e dispositivi che permettono di ricreare un ambiente così simile alla realtà che un utilizzatore immerso non solo interagisce con l'ambiente stesso ma non è in grado di avvertire le differenze rispetto alla realtà.
- Si parla invece di **realtà aumentata** (augmented reality) quando, attraverso opportuni dispositivi semi-trasparenti, si riesce a sovrapporre immagini reali e sintetiche nella stessa scena.
- I sensi dell'utilizzatore (soprattutto la vista) sono portati a credere che il mondo sintetico costruito dal computer esista veramente.
- Si simula il tatto mediante dispositivi che, indossati dall'utilizzatore, ne stimolano i recettori e forniscono la sensazione di toccare oggetti reali (dispositivi aptici e meccanismi di force-feedback).

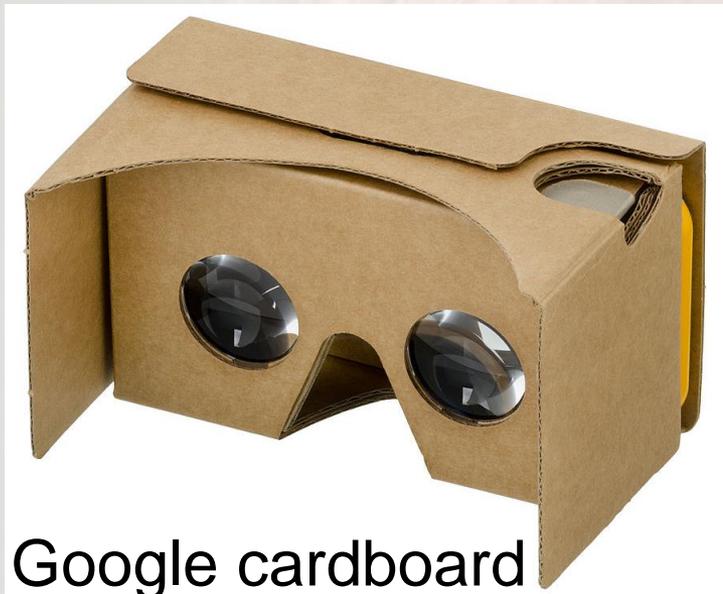
Realtà Virtuale



Addestramento alla guida di una scavatrice



Virtual Reality: recenti dispositivi



Google cardboard



HTC Vive



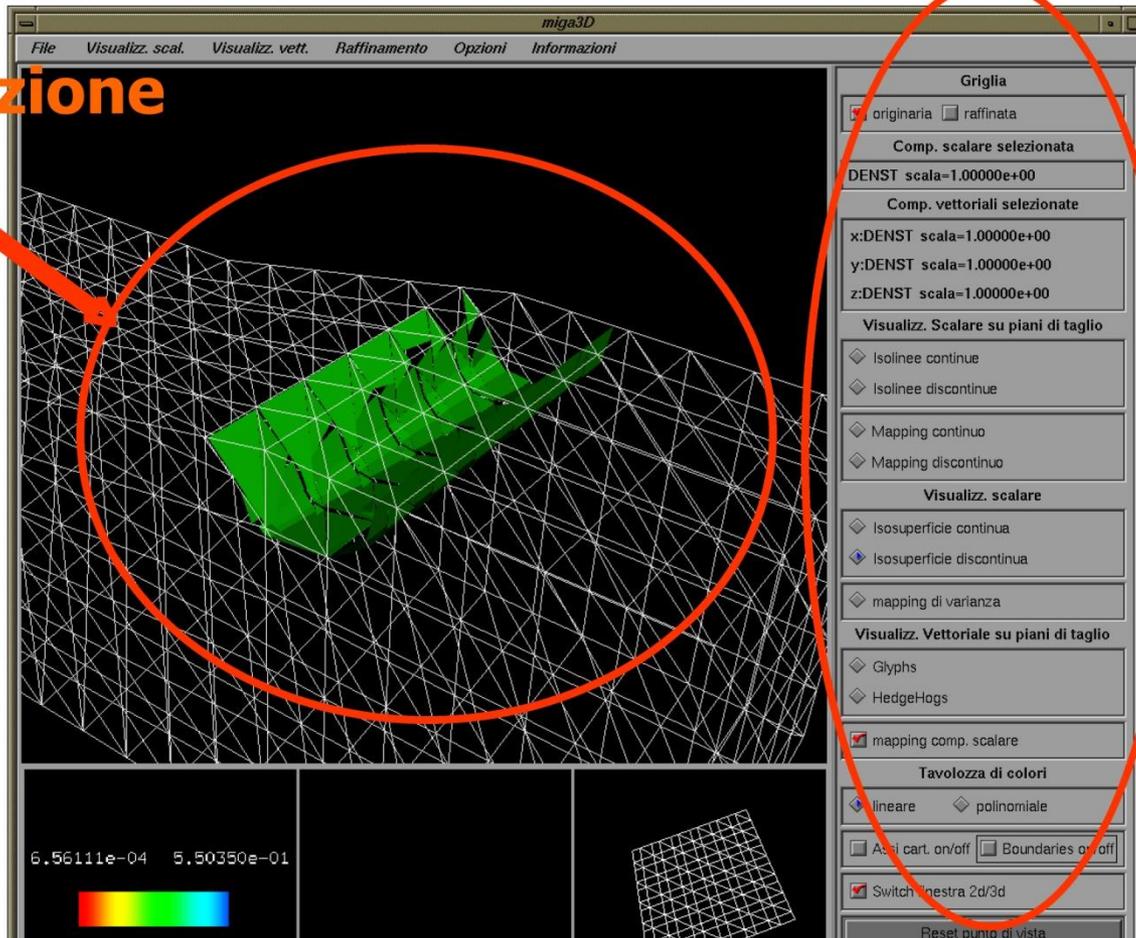
Oculus Rift

Visualizzazione Scientifica

- Disciplina che si occupa della rappresentazione visiva dei fenomeni naturali modellati matematicamente e simulati numericamente.
 - I dati che si vogliono rappresentare possono essere, oltre che generati da programmi di simulazione numerica, anche acquisiti tramite dispositivi che abbiano uscita digitale.
 - In generale i dati da elaborare e visualizzare sono caratterizzati dalla mancanza di rappresentazione geometrica definita (come è il caso, al contrario degli oggetti solidi modellati al CAD).
 - La visualizzazione con le tecniche della computer graphics interattiva devono favorire il processo di comprensione di fenomeni o costituire supporto alle decisioni.
-

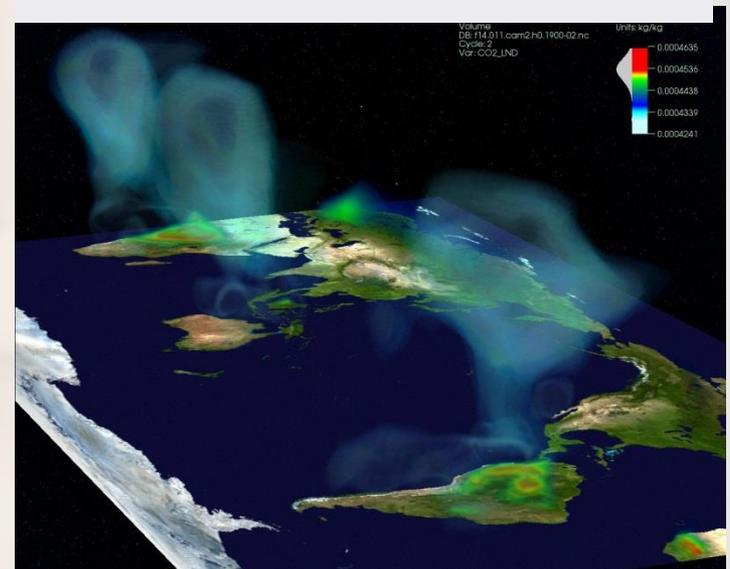
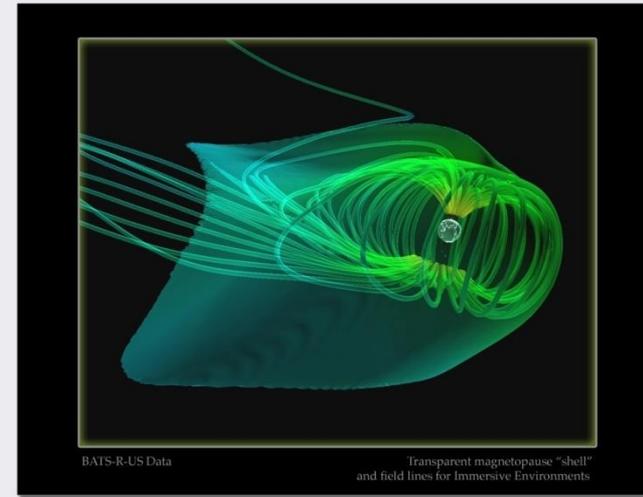
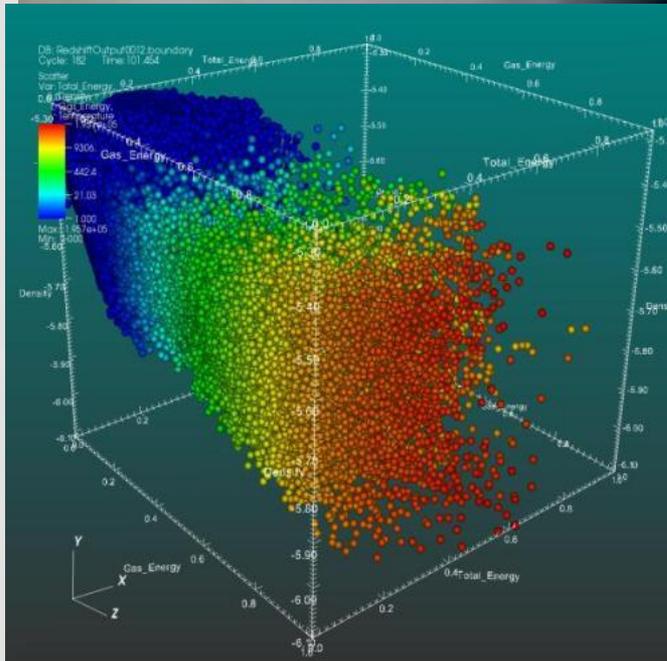
Visualizzazione Scientifica

Area di visualizzazione



Parametri Numerici

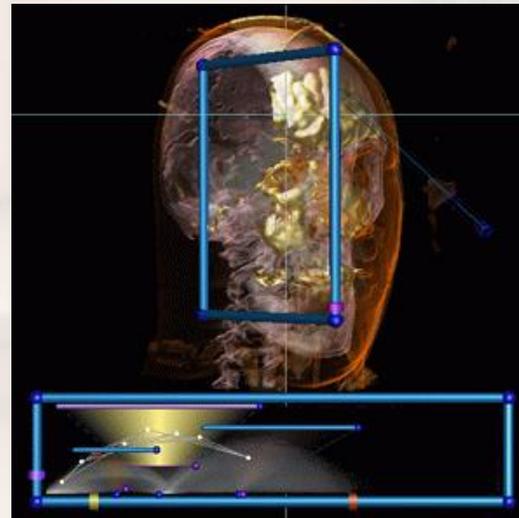
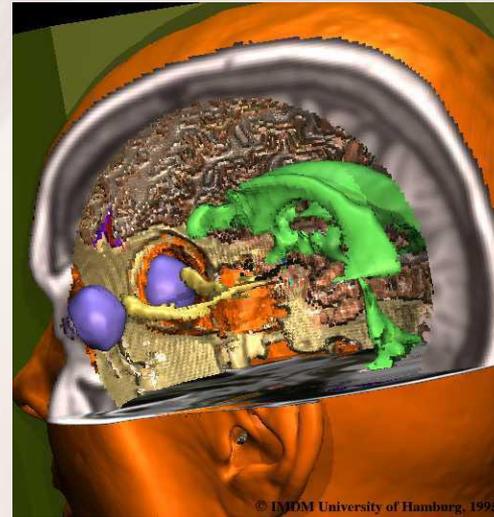
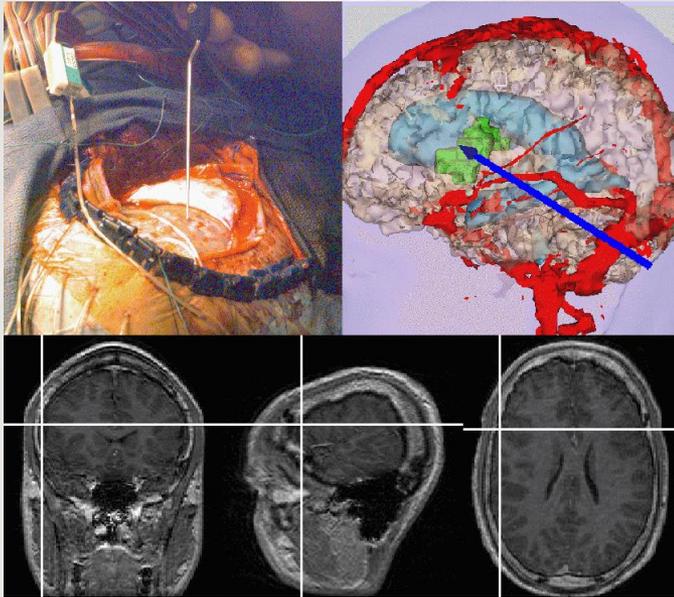
Visualizzazione Scientifica



Medical Imaging

- Tramite tecniche grafiche si vogliono rappresentare i dati planari (2D) o volumetrici (3D) acquisiti da dispositivi non invasivi (TAC, RMN): l'obiettivo è l'analisi di particolari anatomici nascosti, masse tumorali, ecc...
- Il fine è ovviamente quello di aiutare il medico nella diagnosi.

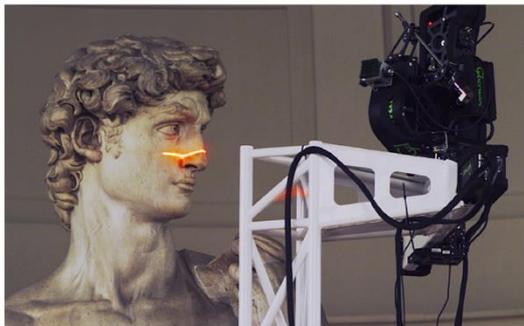
Medical Imaging



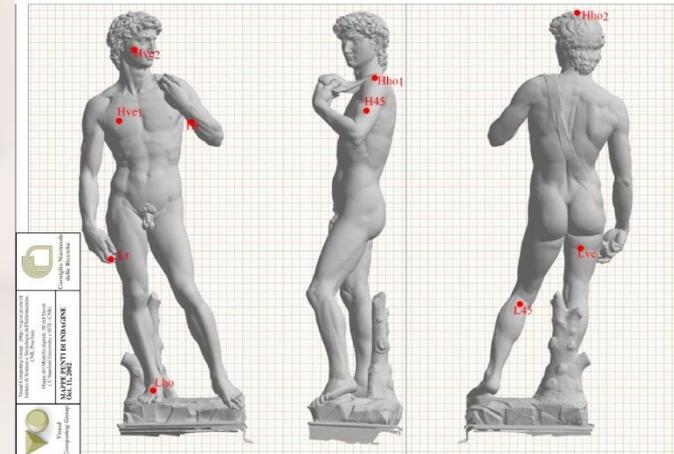
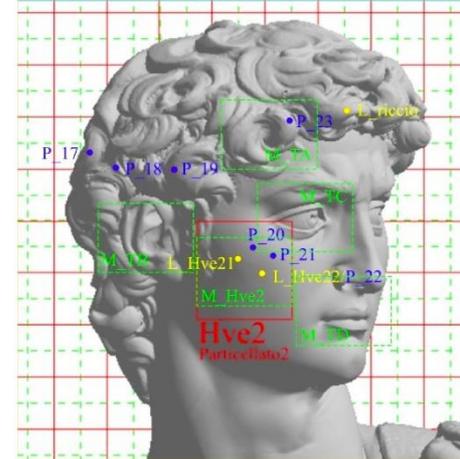
Beni Culturali

- Settore in rapida espansione, in cui si usa grafica 3D per costruire dei modelli e gallerie virtuali.
- Si costruiscono rappresentazioni il più possibile fedeli degli oggetti esistenti (pitture, sculture, bassorilievi, reperti archeologici).
- Applicazioni della grafica interattiva 3D nella conoscenza, conservazione, valorizzazione e fruizione dei beni culturali.
- Interazione spinta con acquisizione fotografica tridimensionale.

Acquisizione...



...modello 3D



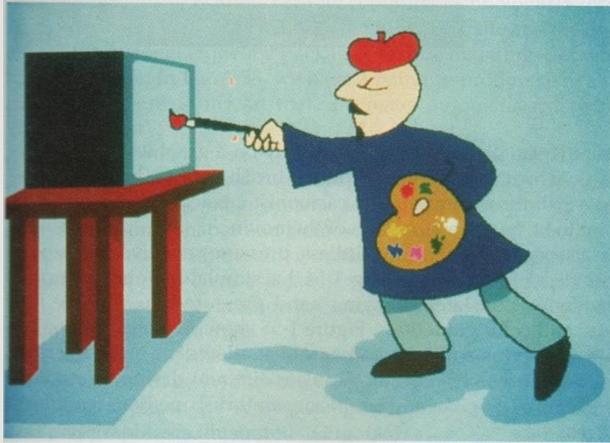
Beni culturali: the Dudley Castle



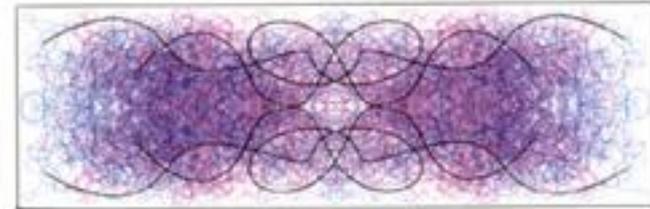
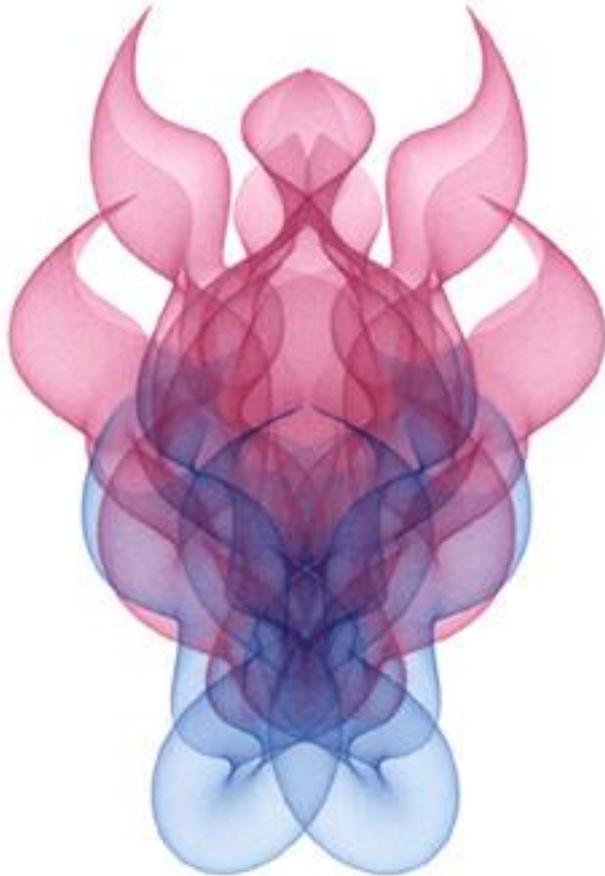
Computer Art

- Alcuni artisti attualmente impiegano graphics tablet che permettono di simulare diverse tipologie di pennelli, colori, ecc... per realizzare disegni direttamente sul computer.
- Altri invece fanno uso di arte matematica, combinando funzioni matematiche, procedure frattali ed altri sistemi per creare immagini 2D o 3D.

Computer Art



Algorithm art



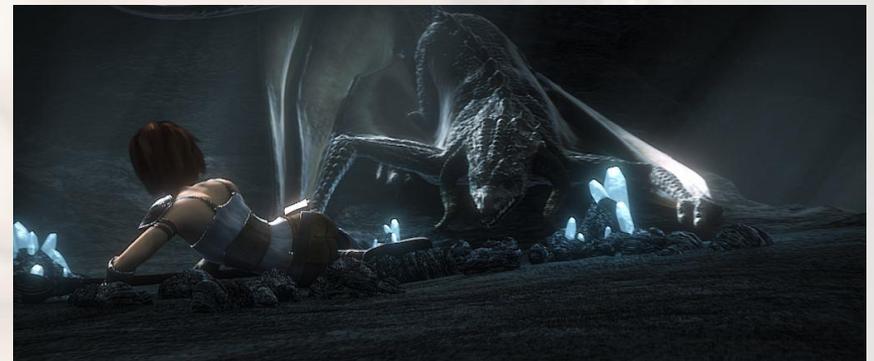
Industria dell'intrattenimento

- E' il settore applicativo nel quale, ad oggi, si investono più risorse in assoluto nel campo della computer graphics.
- Sono due i campi di applicazione:
 - I videogiochi si basano su strumenti hardware e tecnologia software sviluppate in grafica interattiva.
 - La realizzazione di cartoni animati sintetici, di sigle e filmati pubblicitari per la TV, di scene virtuali per il cinema, con o senza la inclusione di persone o oggetti reali si basano quasi esclusivamente su tecniche di computer graphics

Movies-1



Movies-2



Games

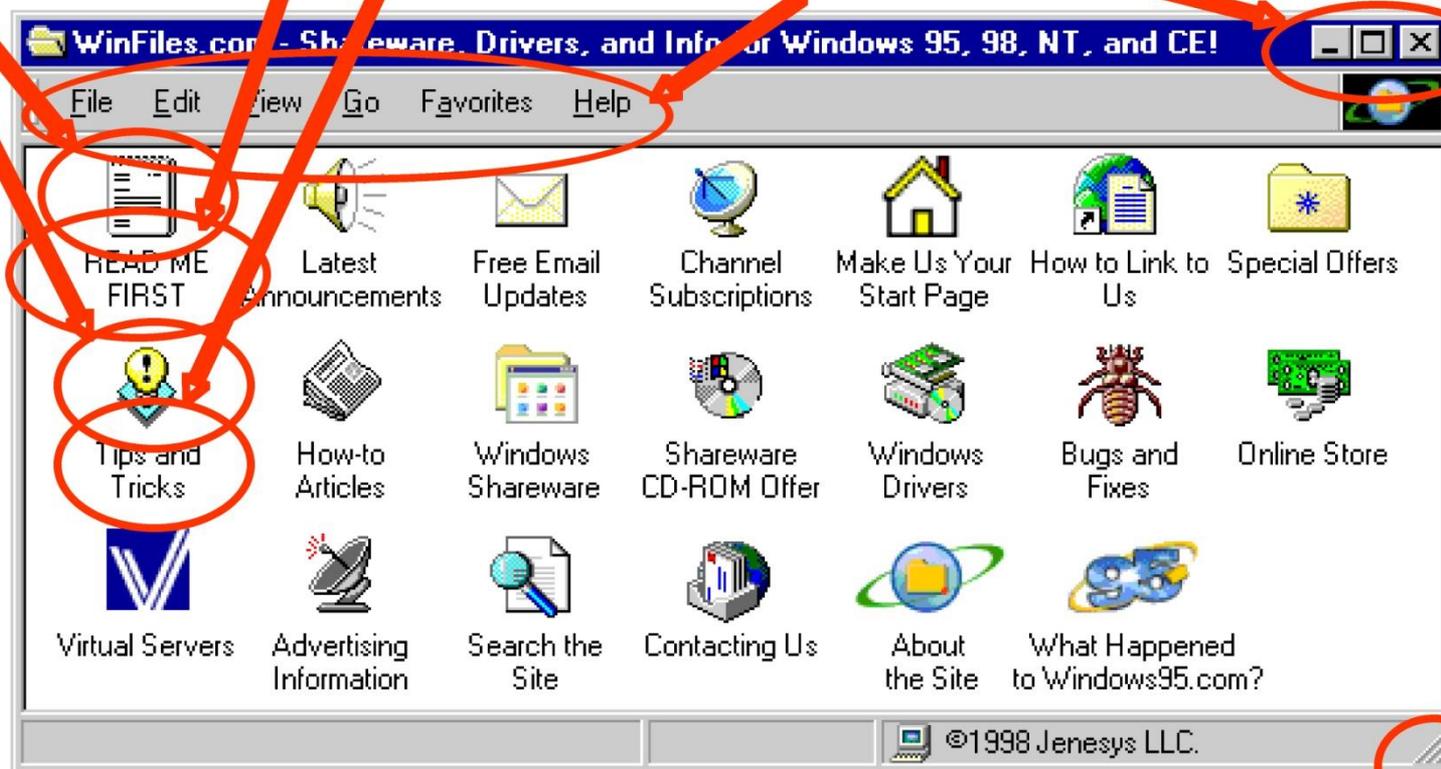


Interfacce Utente

- Le interfacce utente grafiche consentono di gestire molteplici attività in modo simultaneo.
- Permettono all'utente di selezionare scelte da menù, icone e oggetti qualsiasi sullo schermo tramite un meccanismo di point&click.
- La tastiera è necessaria quando bisogna inserire il testo.
- Programmi come word processor, spreadsheet, desktop publishing (DTP) sono tipiche applicazioni che traggono enorme vantaggio dall'uso di interfacce grafiche (GUI)
- La facilità di uso di strumenti grafici in ogni ambiente applicativo, insieme con lo sviluppo delle reti telematiche ha portato alla possibilità di sostituire lo scambio di informazioni sul supporto cartaceo con la messa a disposizione delle stesse informazioni in un ambiente ipertestuale e multimediale.

Interfacce Utente

Icone Descrizioni testuali Menu *Handles* standard



Ridimensionamento

Interfacce Utente

Compiz on Fedora 6



Looking Glass 3D

WebGL – OpenGL ES 2.0 per il Web

- WebGL è uno standard web per la grafica 3D basata su OpenGL ES 2.0.
- WebGL offre una API che impiega gli shader e il linguaggio GLSL per il rendering di scene 3D in una pagina web. Il linguaggio di sviluppo è JavaScript.
- I principali sviluppatori di browser Apple (Safari), Google (Chrome), Mozilla (Firefox), e Opera (Opera) sono membri del WebGL Working Group.

<https://www.khronos.org/webgl/>

https://www.khronos.org/webgl/wiki/Main_Page

- Potete verificare se il vostro browser supporta WebGL

<http://get.webgl.org/>

Istallazione degli strumenti di sviluppo

1. Editor di testo:

- Notepad, Notepad++, Sublime Text, Visual Web Developer Express, ...

2. Browser web che supporti WebGL:

- Mozilla Firefox, Google Chrome, Opera, Apple Safari, Internet Explorer 11, ...

3. Framework WebGL (opzionale):

- THREE.js, Babylon.js, ...

WebGL browser support

WebGL - 3D Canvas graphics - OTHER

Global

91.71%

Method of generating dynamic 3D graphics using JavaScript, accelerated through hardware

Current aligned Usage relative Date relative Show all

IE	Edge *	Firefox	Chrome	Safari	Opera	iOS Safari *	Opera Mini *	Android Browser *	Chrome for Android
			49						
			59			10.2		4.4	
	14	54	60	10.1		10.3		4.4,4	
11	15	55	61	11	47	11	all	56	61
	16	56	62	TP	48				
		57	63		49				
		58	64						

Notes Known issues (1) Resources (11) Feedback

WebGL support is dependent on GPU support and may not be available on older devices. This is due to the additional requirement for users to have [up to date video drivers](#).

Note that WebGL is part of the [Khronos Group](#), not the W3C.

 WebGL context is accessed from "experimental-webgl" rather than "webgl"

Esempi WebGL

- Stars: <http://stars.chromeexperiments.com/>
- World Economy: <http://globe.cid.harvard.edu/?mode=gridSphere&id=DO>
- Ancient Earth: <http://dinosaurpictures.org/ancient-earth/#600>
- Eye raytracer: <http://www.vill.ee/eye/>
- <https://www.chromeexperiments.com>
- https://www.khronos.org/webgl/wiki/Demo_Repository

Grafica Computerizzata
Corso di Laurea in Informatica
Docente: Giovanni Di Domenico

Modelli e Sistemi Grafici

-
- Primi passi della CG
 - Aspetti della generazione delle immagini
 - Architetture grafiche

Computer Graphics

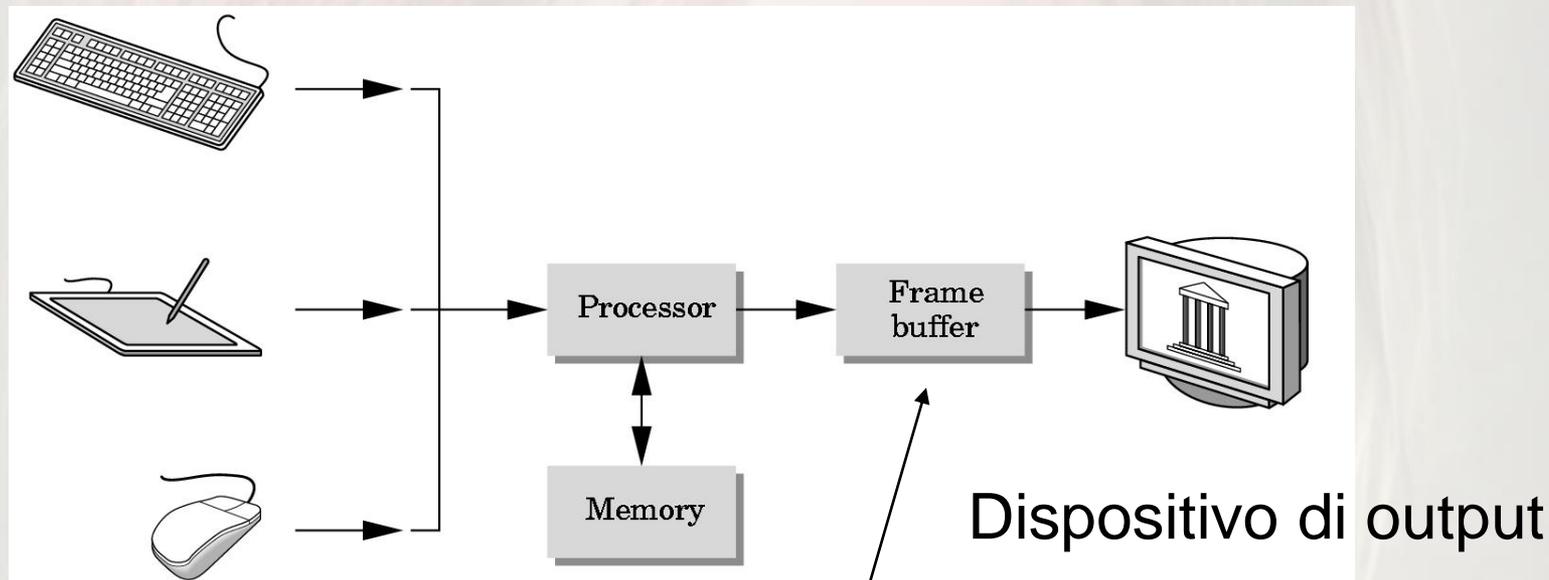
- La Grafica Computerizzata (CG) si occupa di tutti gli aspetti riguardanti la generazione di una immagine mediante l'uso di un Personal Computer.
 - Hardware
 - Software
 - Applicazioni

Un esempio

- Con quale software è stato modellato?
 - **Software:** Maya per la modellazione ed il rendering ma Maya è sviluppato sopra OpenGL.
 - Quale tipo di **hardware** è necessario?
 - Un PC con una scheda grafica
-
- **Applicazione:** L'oggetto è una rappresentazione del sole che un'artista ha realizzato per un'animazione in un planetario.



Un sistema grafico di base



Dispositivi di input

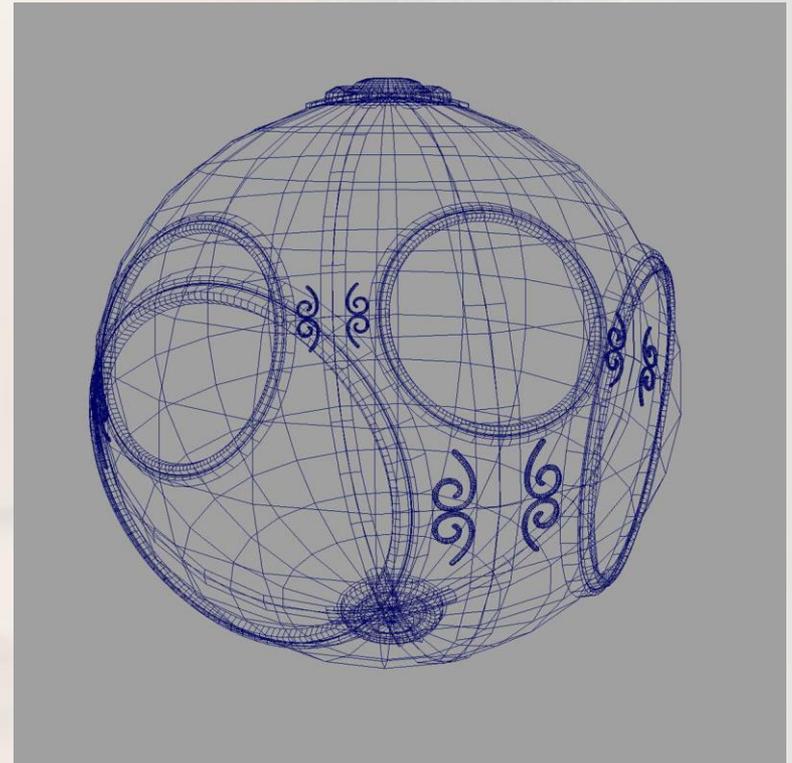
Buffer di memoria per
l'immagine generata

Computer Graphics: 1950-1960

- La grafica computerizzata risale alle origini dei primi dispositivi di calcolo automatico
 - Disegno di carte geografiche
 - Plotters
- La visualizzazione utilizzava un convertitore A/D collegato ad un monitor CRT di tipo vettoriale o calligraphic.
 - I costi per il refresh dei CRT erano troppo alti
 - Computer lenti, costosi e poco affidabili

Computer Graphics: 1960-1970

- *Wireframe* graphics
 - Si disegnano solo le linee
- Sketchpad
- Display Processors
- Introduzione dei tubi catodici



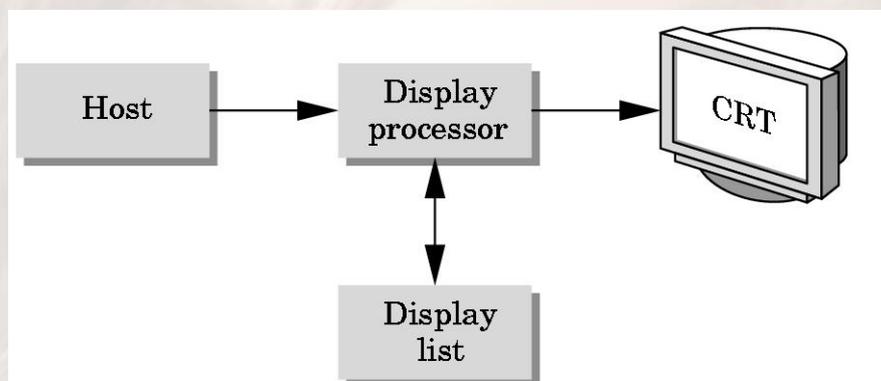
Rappresentazione wireframe

Sketchpad

- Sviluppato da un'idea di Ivan Sutherland durante il lavoro di dottorato al MIT
 - Riconosce il potenziale dell'interazione uomo-macchina
 - Idea del Loop
 - Disegna qualcosa
 - L'utente sposta la penna ottica
 - Il computer disegna una nuova immagine
- Sutherland sviluppò molti dei comuni algoritmi sulla computer graphics
- Il filmato Sketchpad sul sito mostra il lavoro di Sutherland.

Display Processor

- Invece di affidare ad un computer il compito di aggiornare il display si impiega un processore specializzato chiamato display processor (DPU).



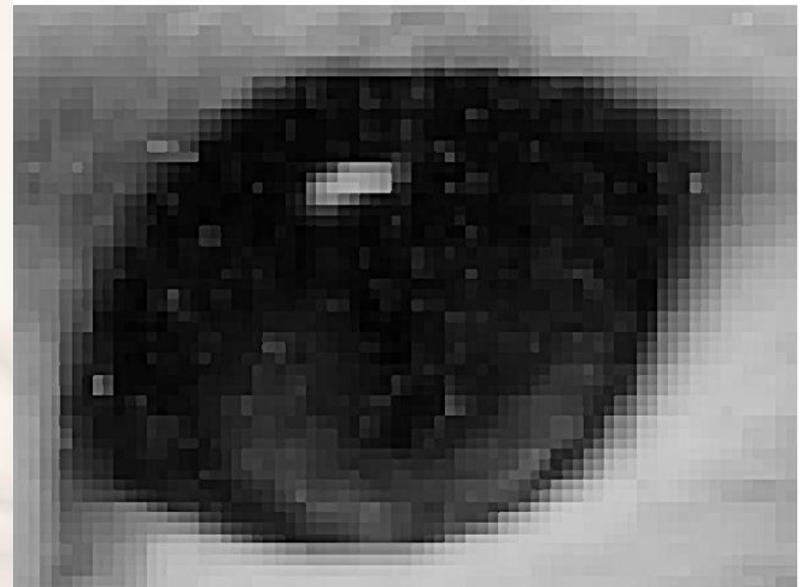
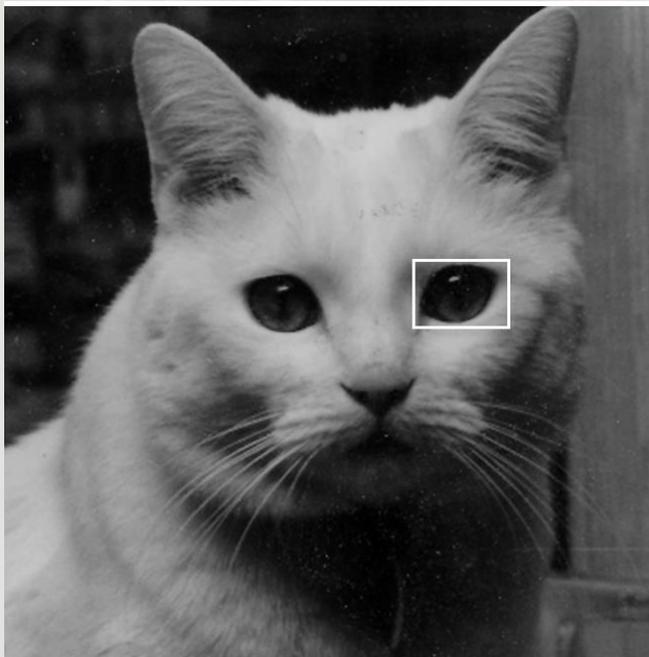
- La grafica è memorizzata in una display list all'interno del display processor
- La macchina ospite compila la display list e la invia al DPU

Computer Graphics: 1970-1980

- Grafica Raster
- Vengono proposti i primi standard grafici
 - IFIPS
 - **GKS** in Europa
 - **Diventa uno standard ISO per 2D**
 - **Core** in Nord america
 - **Non riesce ad imporsi come standard ISO per il 3D**
- Introduzione delle prime Workstation e dei primi PC

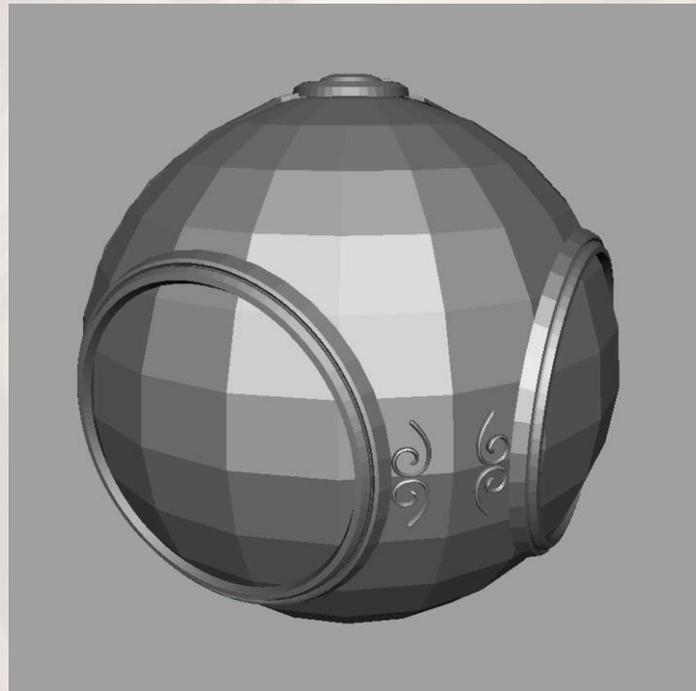
Grafica Raster

- L'immagine è prodotta da una matrice (*raster*) di singoli elementi dell'immagine chiamati *pixel* all'interno del *frame buffer*



Grafica Raster

- La grafica raster permette di effettuare il paesaggio da immagini wireframe ad immagini in cui i poligoni sono riempiti.



Frame buffer

- I pixel sono memorizzati in una parte della memoria di sistema chiamata **frame buffer**
- La quantità di memoria dedicata al frame buffer dipende da:
 - Risoluzione
 - Profondità (depth): numero di bit per pixel
- La profondità determina il numero di colori che possiamo rappresentare
 - 1 bit (2 colori), 8 bit (256 colori)
- I sistemi true-color o RGB-color hanno una profondità di 24 bit per componente
 - 8 bit per il rosso, 8 bit per il verde, 8 bit per il blu

Risoluzioni e aspect ratio

- L'aspect ratio indica il rapporto fra la larghezza e l'altezza di una immagine bidimensionale
 - Tipiche misure sono 4:3(TV) e 16:9(HDTV)
- I vecchi monitor per personal computer hanno risoluzioni:
 - 640 x 480 (VGA)
 - 1024 x 768 (XVGA)
 - 1280 x 1024 (SXGA)
- I monitor HDTV hanno risoluzioni verticali di 780 o
- 1080 sia progressivo (720p, 1080p) che interlacciato
- (720i, 1080i)
 - HDTV: 1920 x 1080 e 1280 x 720
 - PC: 1920 x 1024 e 1280 x 768

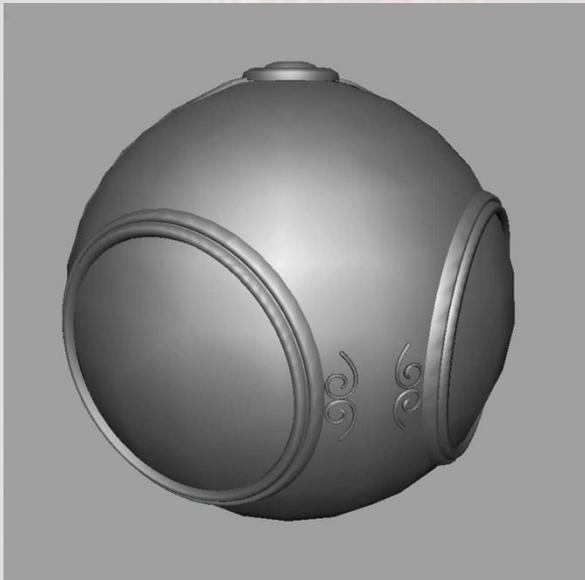


PCs and Workstations

- Sebbene oggi non ci sia più una netta distinzione tra PC e workstation, storicamente hanno avuto un'evoluzione differente
 - Le prime workstation erano caratterizzate da:
 - Collegamenti di rete utilizzando il modello client-server
 - Un alto grado di interattività
 - Nei primi personal computer parte della memoria di sistema era dedicata al frame buffer
 - Si potevano facilmente modificare le immagini cambiando il contenuto del buffer

Computer Graphics: 1980-1990

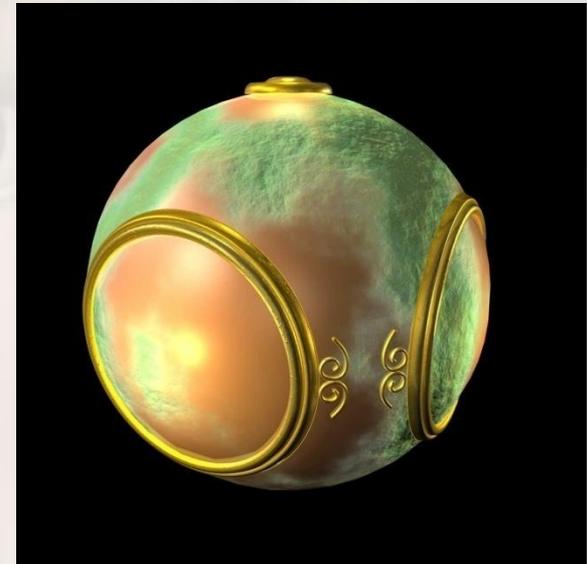
- La ricerca inizia a spingere verso il realismo



smooth shading



environment
mapping



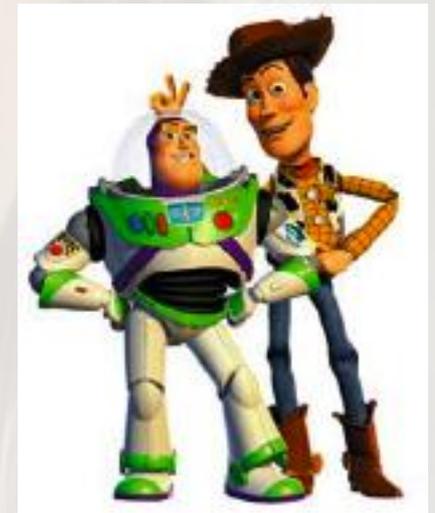
bump mapping

Computer Graphics: 1980-1990

- Special purpose hardware
 - Silicon Graphics geometry engine
 - La pipeline grafica è implementata tramite VLSI
- Industry-based standards
 - PHIGS
 - RenderMan
- Grafica in rete: X Window System
- Human-Computer Interface (HCI)

Computer Graphics: 1990-2000

- OpenGL API
- L'hardware si evolve offrendo nuove caratteristiche
 - Texture mapping
 - Blending
 - Accumulation, stencil buffers
- Produzione dei primi film realizzati completamente in CG
 - Toy Story è il primo film in CG

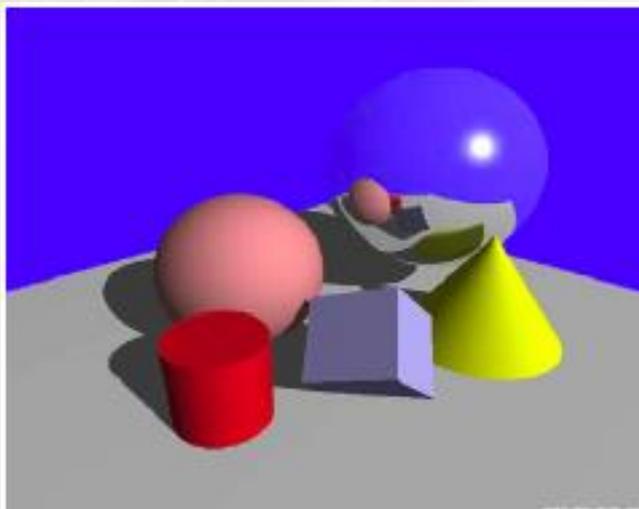


Computer Graphics: 2000-oggi

- Nasce il concetto di fotorealismo
- Le schede grafiche per i PC dominano il mercato attraverso le GPU (Graphic Unit Processor)
 - Nvidia, ATI (ora AMD)
- Nasce una vera e propria industria basata sulla CG
- I video giochi e i video giocatori determinano la direzione in cui si muove il mercato
 - Indirettamente finanziano anche la ricerca
- Pipeline grafiche programmabili
- Sviluppi di progetti basati su AI per l'interazione avanzata uomo-elaboratore: vedi il filmato del progetto Milo

Fotorealismo

- Uno degli obiettivi della CG è produrre immagini indistinguibili dalla realtà
- Il termine fotorealismo è comunemente usato per indicare di quanto un'immagine digitale è simile alla realtà
 - Una formalizzazione del concetto non è semplice



Poco fotorealistico



Molto fotorealistico

Graphics Processing Unit (GPU)

- La GPU è il microprocessore di una scheda video per computer o console
- Specializzate nell'eseguire elaborazioni 3D
 - Bandwidth e velocità di elaborazione circa 10 volte una CPU
- Utilizzata anche per applicazioni general purpose (GPGPU)

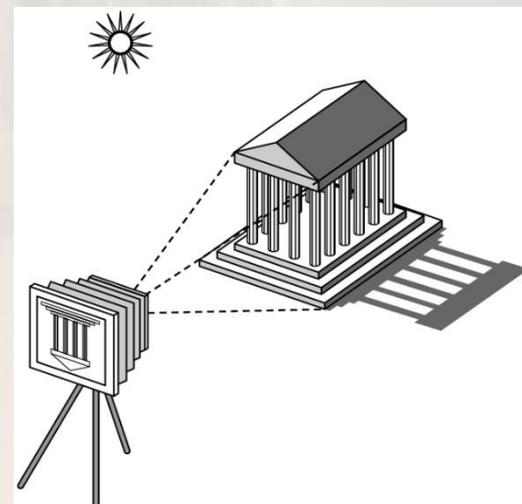


Formazione dell'immagine

- La CG genera immagini sintetiche utilizzando approcci ispirati alla realtà
 - Videocamere
 - Microscopi
 - Telescopi
 - Sistema visivo umano

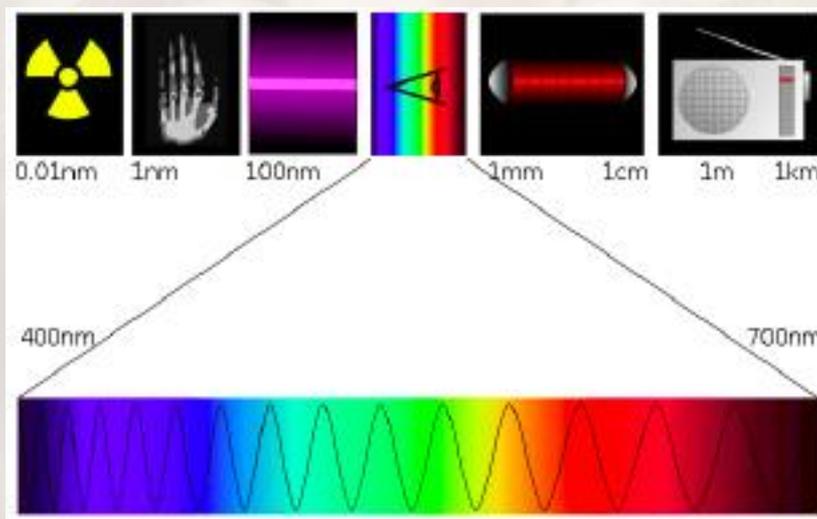
La scena

- Per poter generare un'immagine partiamo da una scena composta da
 - Oggetti
 - Osservatore
 - Sorgenti di luce
- All'interno di una scena è necessario specificare i seguenti parametri
 - Forma, colore e tipo di luce
 - Parametri che definiscono il tipo di materiale
 - La posizione e la direzione dell'osservatore
- Oggetti, sorgenti di luce e l'osservatore sono sempre indipendenti



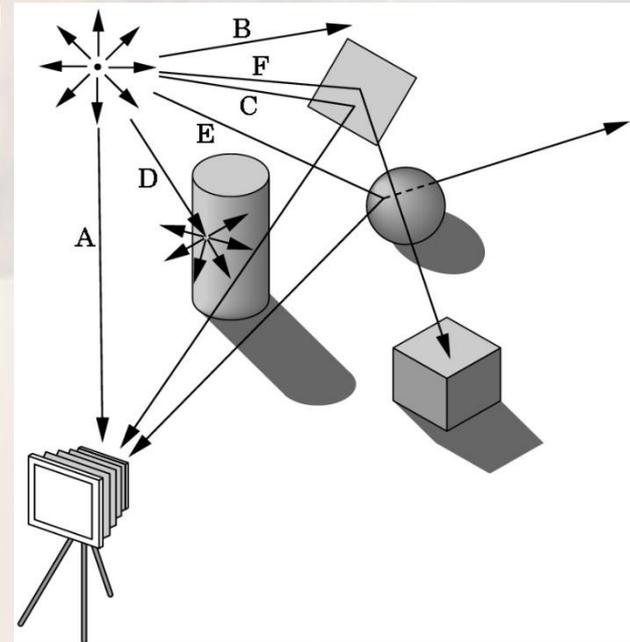
La luce

- La luce è la porzione dello spettro elettromagnetico visibile all'occhio umano
- La lunghezza d'onda è compresa tra 400 nm e 700 nm
- Le lunghezze d'onda maggiori appaiono rosse mentre le più minori appaiono blu



Computer graphics e ottica geometrica

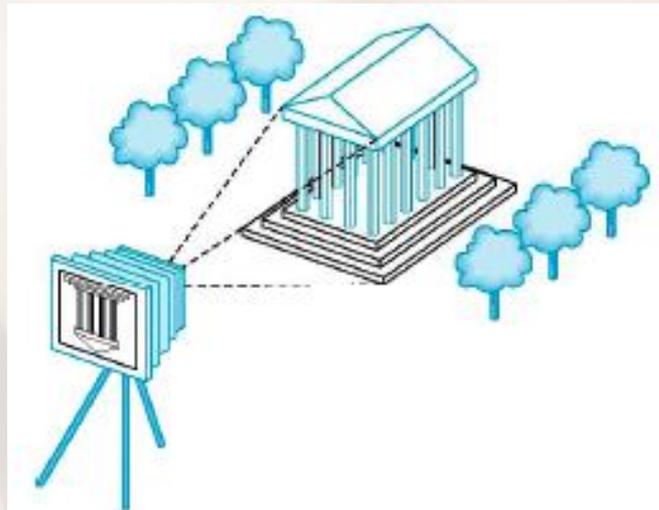
- La natura della luce come onda elettromagnetica non viene mai presa in considerazione nella CG
- Nella CG la luce è considerata attraverso il modello dell'ottica geometrica
- Possiamo creare un'immagine seguendo i raggi dalla sorgente di luce fino alla lente della camera (ray tracing)



Il percorso di un raggio può essere molto complesso da seguire

Pinhole Camera

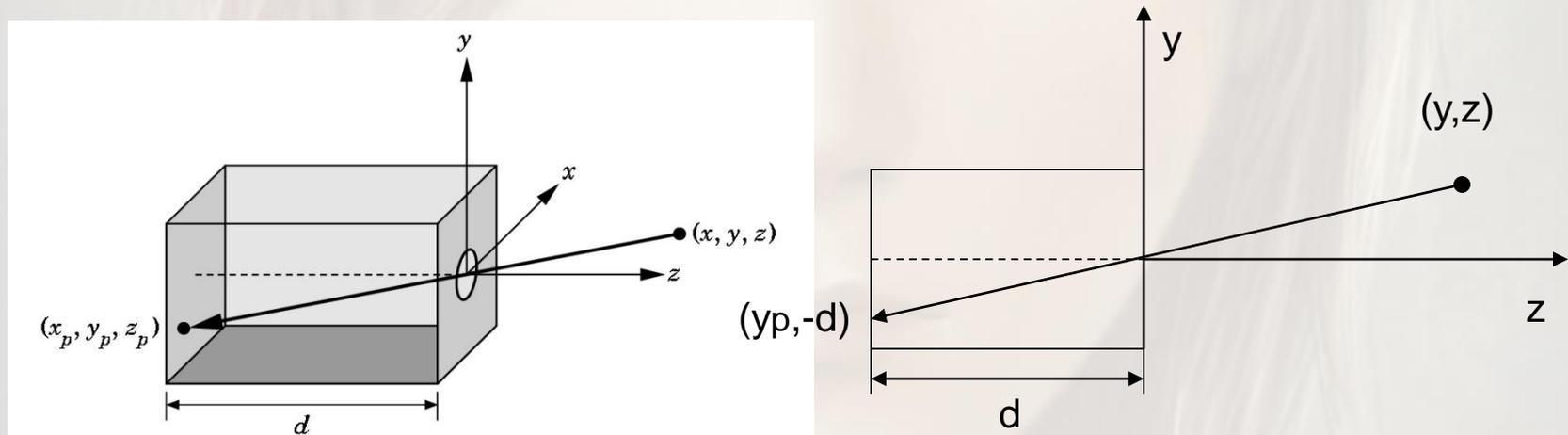
- Una pinhole camera (camera oscura) è una scatola chiusa con un piccolo foro su un lato che lasci entrare la luce
- La luce proietta sul lato opposto (una lastra) all'interno della scatola l'immagine capovolta di quanto si trova avanti al foro
 - Più il foro è piccolo e più l'immagine risulta nitida e definita



Pinhole Camera

- La lastra in cui si forma l'immagine è a distanza d dal foro
- Il punto (x_p, y_p, z_p) sulla lastra è chiamato proiezione del punto (x, y, z) nello spazio, dove:

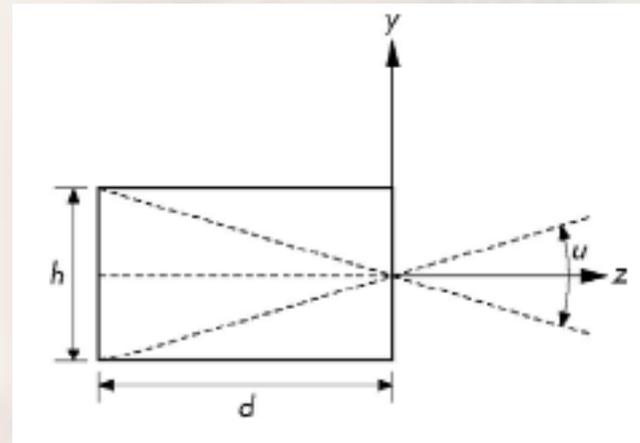
$$x_p = -\frac{x}{z/d} \quad y_p = -\frac{y}{z/d} \quad z_p = -d$$



Field of view

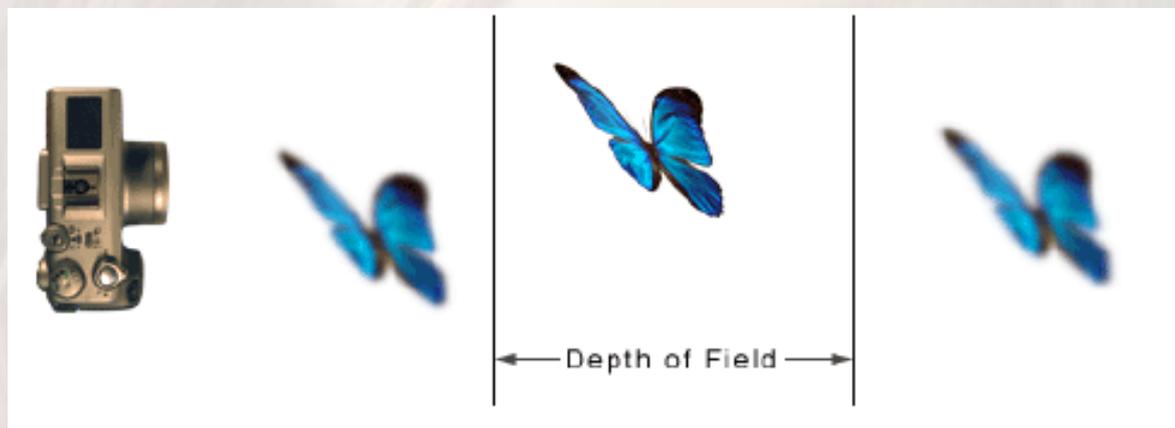
- Il field of view (campo di vista) è l'angolo formato dal più grande oggetto visibile sulla lastra
- Se h è l'altezza della camera allora l'angolo di vista è pari a :

$$u = 2 \tan^{-1} \frac{h}{2d}$$



Profondità di campo

- Il termine depth of field (profondità di campo) è la distanza davanti e dietro al soggetto principale che appare nitida o a fuoco



- La pinhole camera ha il vantaggio di avere una profondità di campo illimitata, ogni punto nel suo campo visivo apparirà a fuoco indipendentemente dalla distanza

Svantaggi della pinhole camera

- Produce immagini poco nitide, perché i raggi luminosi provenienti dal soggetto divergono e creano piccoli cerchi
 - Per aumentare la nitidezza è necessaria una diminuzione del diametro e dello spessore del foro
 - Un foro troppo stretto comporta inoltre la comparsa di problemi di diffrazione
- Non è possibile modificare il field of view
- L'utilizzo delle lenti permette di risolvere questi problemi

Sistema Visivo umano

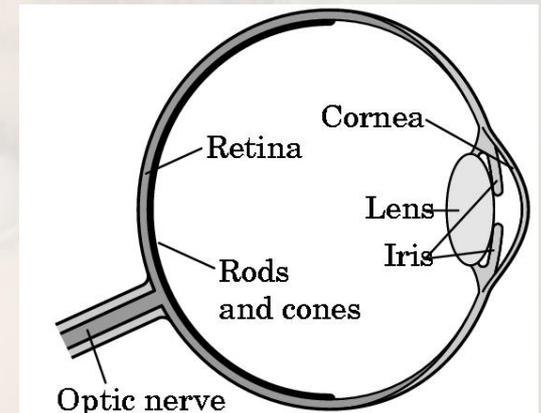
- L'occhio umano possiede una lente che cattura l'immagine proiettandola sulla retina
- L'iride permette di variare la quantità di luce che colpisce la lente
- Sulla retina sono presenti due tipi di sensori chiamati **coni** e **bastoncelli**

- **Coni**

- Sono responsabili della visione a colori ma sensibili solo a luci piuttosto intense
- Si suddividono in tre differenti tipologie responsabili della visione dei tre colori primari rosso, verde e blu
- Operano soprattutto in condizione di luce piena

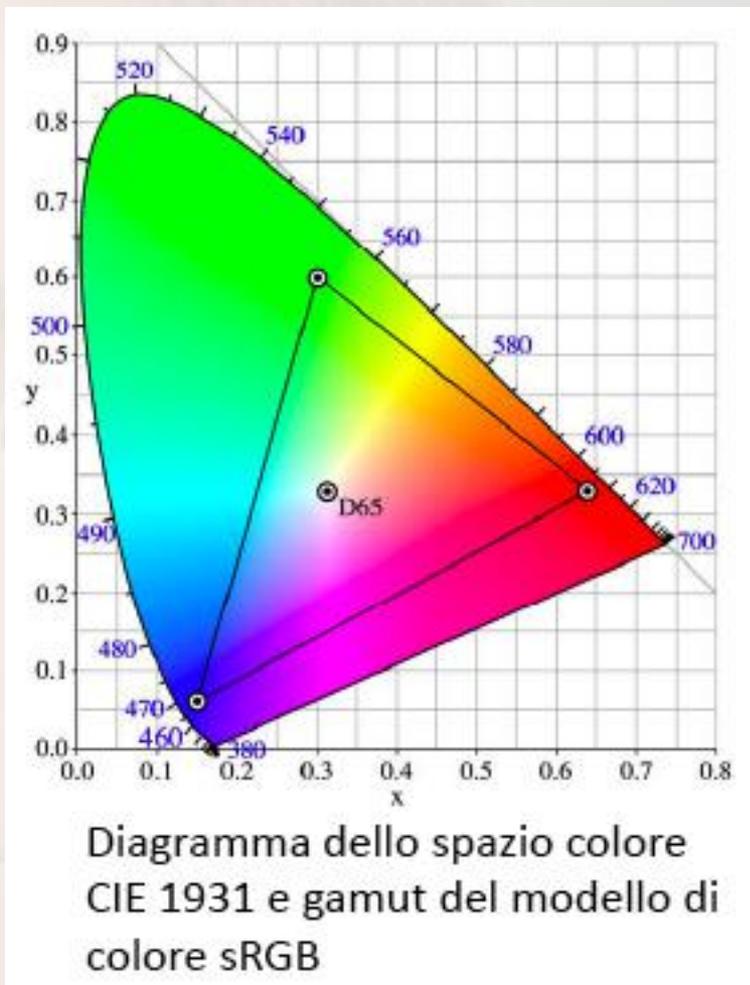
- **Bastoncelli**

- Permettono la visione anche quando la luce è scarsa
- Bastoncelli sono particolarmente sensibili a basse intensità di luce ma non ai colori



Modello di colore

- Un modello di colore è un modello matematico astratto che permette di rappresentare i colori in forma numerica
- Un modello di colore permette ad una applicazione di associare ad un vettore numerico un elemento dello spazio dei colori
- Il gamut (o gamma) è un sottoinsieme limitato dello spazio dei colori rappresentabile con il modello di colore

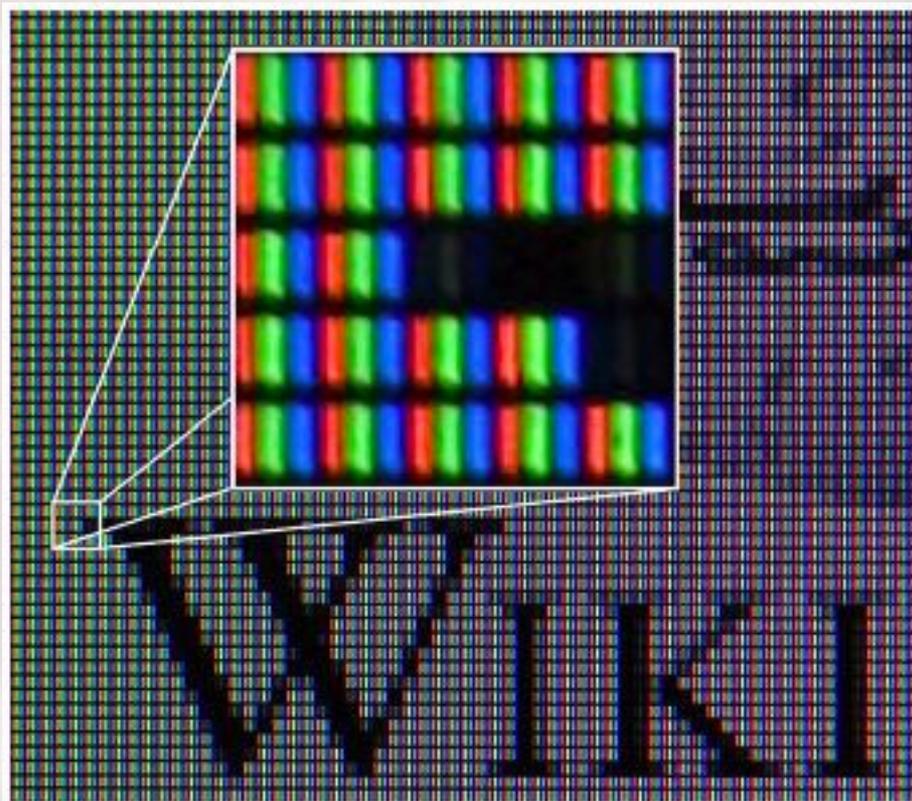


Due modelli di colore

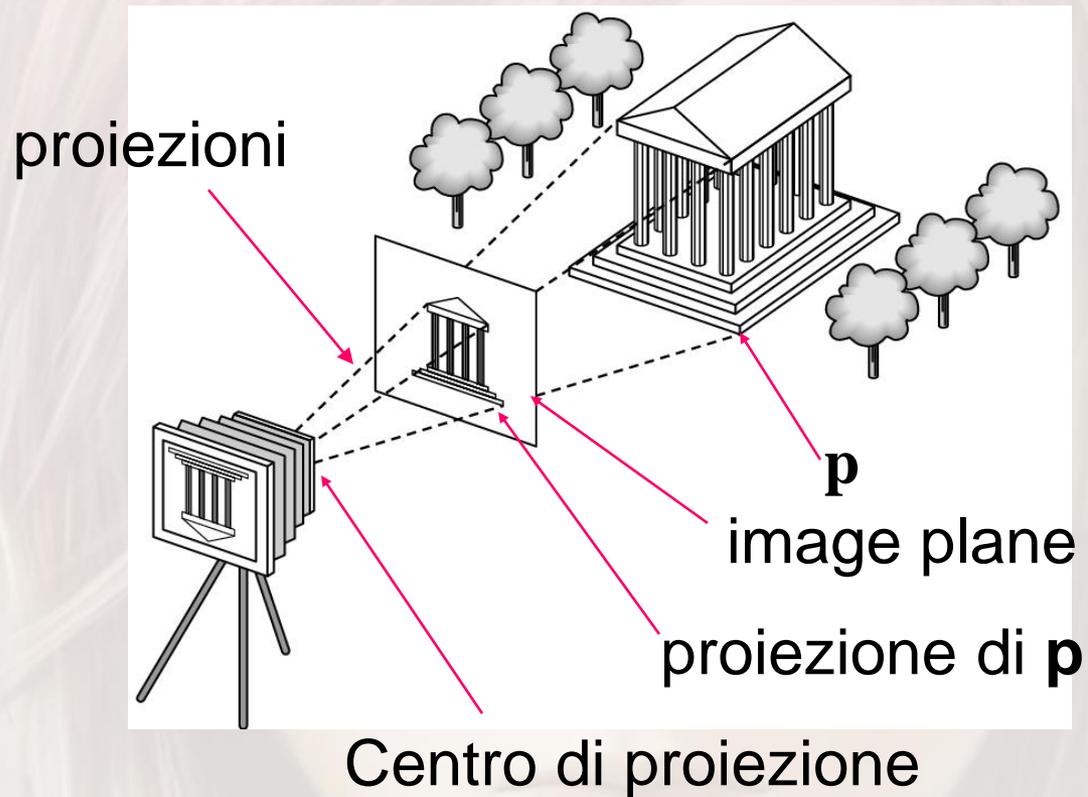
- Mescolanza additiva
 - Si basa sul meccanismo di visione umana
 - Il colore è formato sommando tre colori primari
 - Usato da CRT, LCD, proiettori, pellicole positive
 - I colori primari sono Rosso(R), Verde (G) e Blue (B)
- Mescolanza sottrattiva
 - Il colore è formato filtrando la luce bianca attraverso il ciano (C), il magenta (M) ed il giallo (G)
 - Interazione luce-materia
 - Stampa
 - Pellicole negative

Modello di colore RGB nei monitor LCD

- In uno schermo a colori ogni pixel è in realtà suddiviso in 3 subpixel dotati di filtro rosso, verde e blu

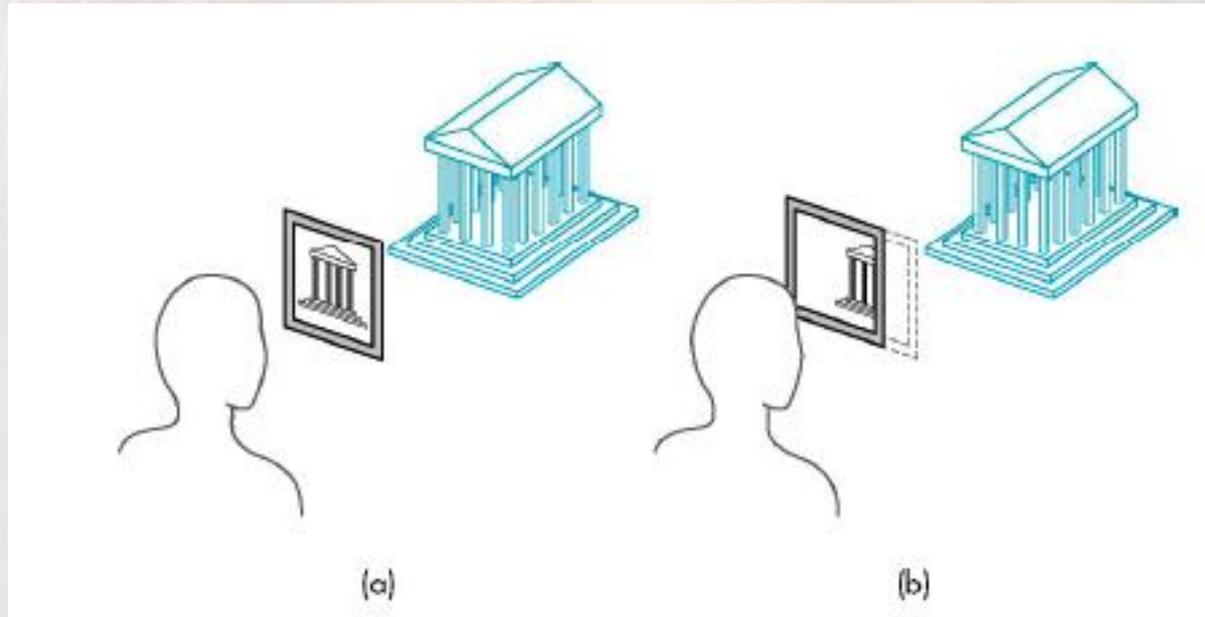


Modello di camera sintetica



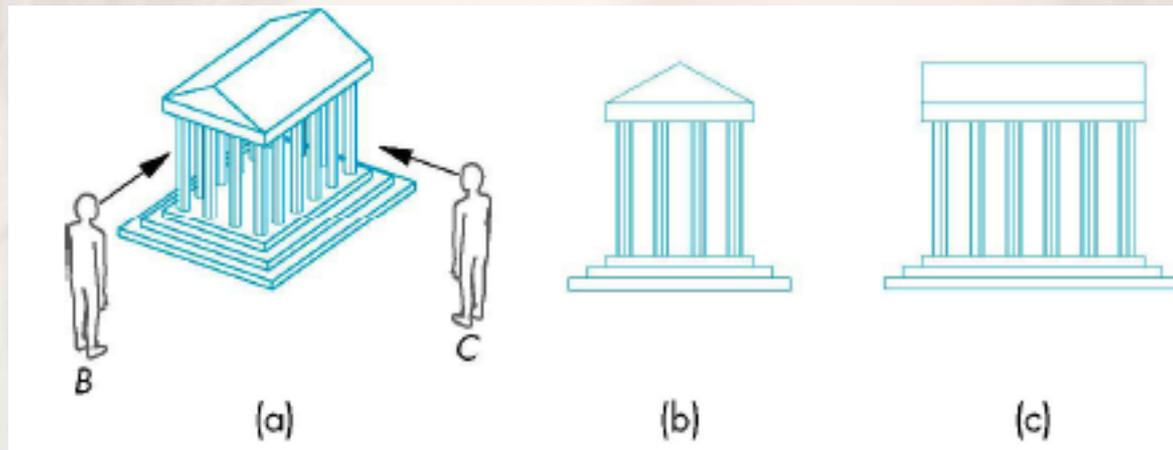
Clipping Window

- La clipping window sul piano di proiezione definisce la finestra attraverso la quale l'osservatore vede la scena



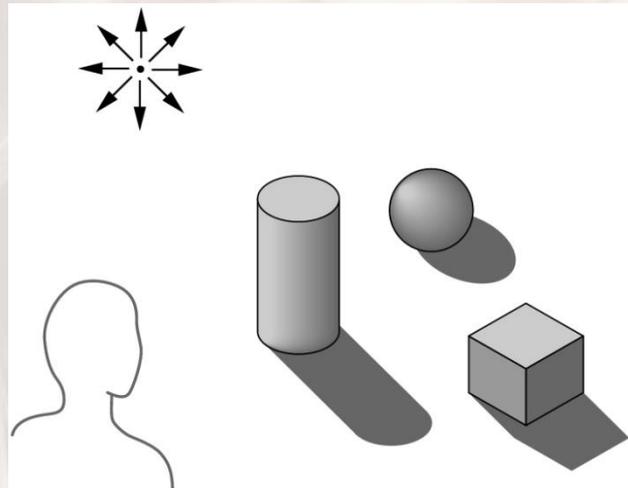
Vantaggi della camera sintetica

- L'osservatore, gli oggetti e le sorgenti di luce sono indipendenti
- La grafica 2D è un caso specifico della grafica 3D
- Permette di avere un API semplice
 - Specifichiamo separatamente oggetti, luci, camera e tutti gli attributi
 - L'immagine finale può essere prodotta in diversi modi
- L'approccio si presta ad essere implementato efficientemente in hardware



Illuminazione locale e globale

- Non è possibile calcolare indipendentemente il colore e le ombre degli oggetti
 - Alcuni oggetti potrebbero bloccare la luce
 - La luce si riflette da un'oggetto ad un'altro
 - Alcuni oggetti potrebbero essere traslucenti

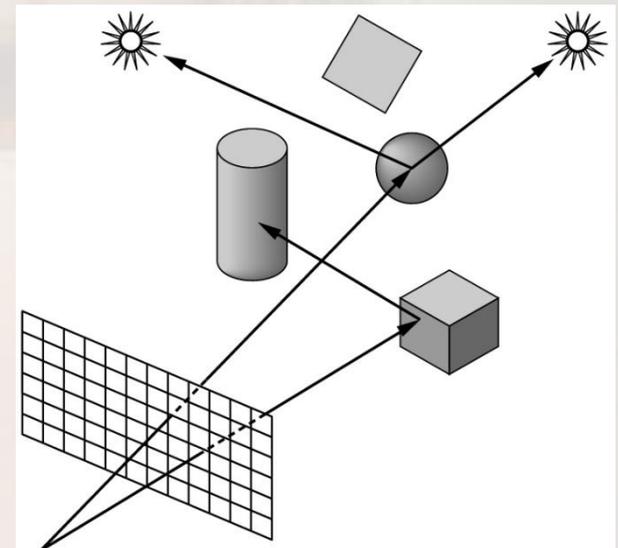


Un API per il modello di camera sintetica

- Il modello di camera sintetica si presta molto bene ad essere implementata via software
- Una API deve poter gestire
 - Oggetti
 - Materiali
 - Osservatore
 - Luci
- Come implementare una API di questo tipo?

Approccio fisico

- **Ray Tracing**: simuliamo la propagazione dei raggi dal centro di proiezione fino a quando non sono assorbiti o vanno all'infinito
 - Gestisce gli effetti di illuminazione globale
 - Lento
- E' necessario tenere l'intera scena in memoria
- **Radiosity**: consideriamo la luce dal punto di vista energetico
 - Molto lento



Architettura a pipeline

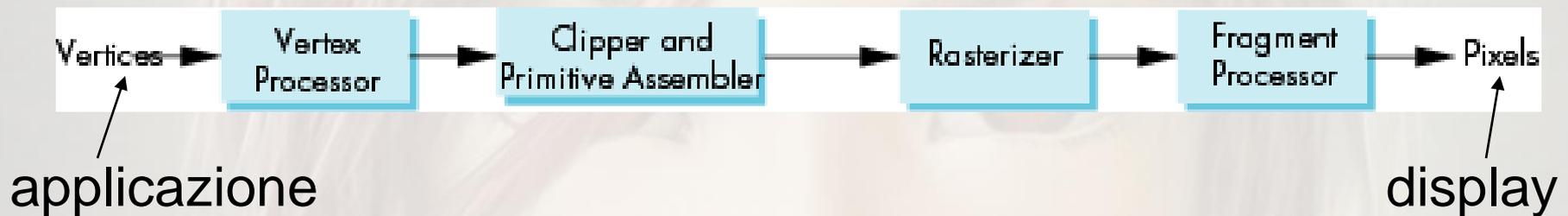
- Gestiamo un oggetto alla volta così come sono stati introdotti nella scena
 - Tiene conto solo degli effetti di illuminazione locale
- L'intero processo può essere implementato tramite le cosiddette architetture a pipeline



- Tutti i passi delle pipeline possono essere implementati in maniera grafica

Graphics Pipeline

- Una graphics pipeline realizza il processo di rendering della scena a partire da un insieme di oggetti



- Gli oggetti sono composti di vertici (anche milioni) i quali definiscono oggetti complessi
- La pipeline processa gli oggetti seguendo l'ordine imposto dall'applicazione
- Ogni oggetto potrà influire sulla formazione dell'immagine finale all'interno del frame buffer

Vertex Processor

- Gli oggetti sono formati da vertici, questo modulo si occupa di convertire gli oggetti da un sistema di coordinate ad un altro sistema
 - Object coordinates
 - Camera (eye) coordinates
 - Screen coordinates
- Ogni cambio di coordinate è equivalente ad matrice di trasformazione
- Il vertex processor si occupa anche di calcolare il colore dei vertici



Projection

- Projection è il processo che si occupa di utilizzare i parametri dell'osservatore nello spazio per produrre una immagine 2D dagli oggetti 3D
 - Proiezione prospettica: tutti i raggi di proiezione terminano nel centro di proiezione
 - Proiezione parallela: tutti i raggi di proiezione sono paralleli, il centro di proiezione è posto all'infinito



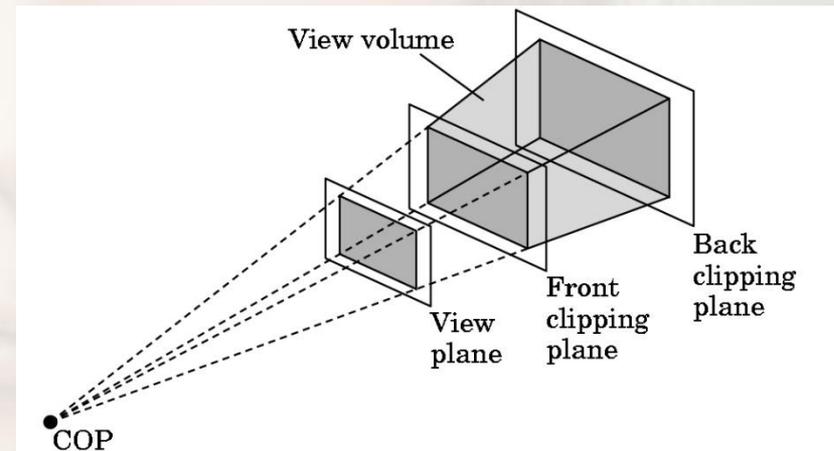
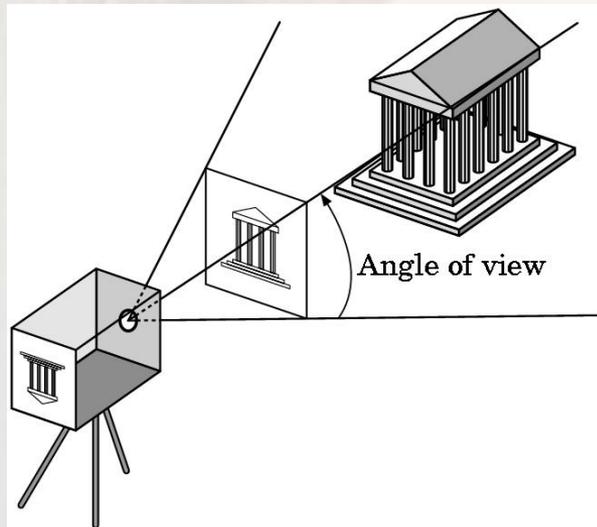
Primitive Assembly

- I vertici processati sono considerati come parte di oggetti (modelli 3D) prima che la fase di clipping e rasterizzazione possa avvenire
 - Line segments
 - Polygons
 - Curves and surfaces



Clipping

- Così come una videocamera non può vedere tutto, la camera virtuale deve escludere quella parti della scena non visibili
- Tutti gli oggetti non presenti nel campo visivo devono essere tagliati fuori dalla scena attraverso il processo di clipping



Rasterization

- Se un oggetto non è “tagliato” fuori allora è necessario determinare il colore appropriato dei pixel
- Rasterizer produce un insieme di frammenti per ogni pixel
- I frammenti sono dei “potenziali pixel”
 - Hanno una posizione nel frame buffer
 - Hanno un colore ed una profondità
- Gli attributi dei vertici degli oggetti sono interpolati dal rasterizer per ottenere i frammenti



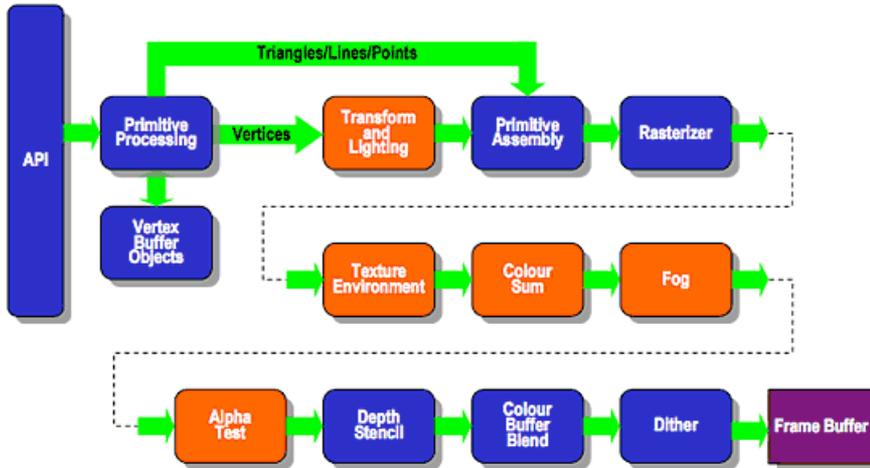
Fragment Processing

- I frammenti sono processati per determinare il colore finale all'interno del frame buffer
- Il colore può essere determinato utilizzando il texture mapping oppure interpolando il colore dei vertici
- I frammenti possono essere scartati da altri frammenti più vicini alla camera
 - Algoritmi di rimozione delle superfici nascoste



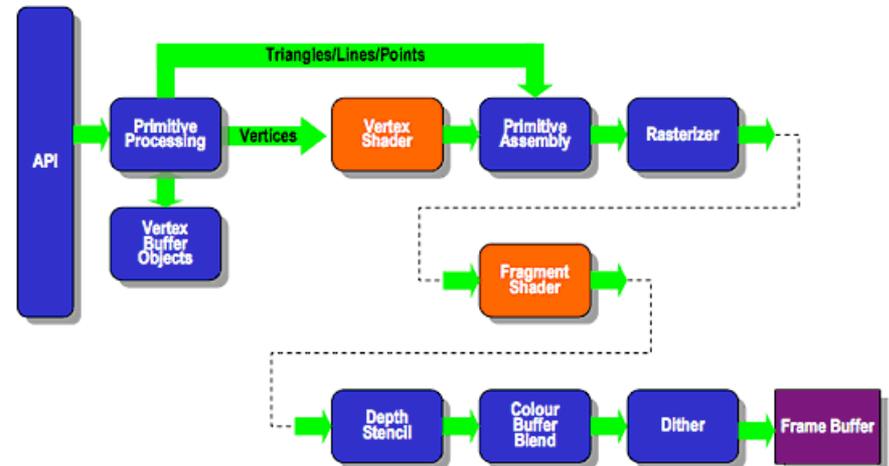
La pipeline in OpenGL

Existing Fixed Function Pipeline



Fixed pipeline

ES2.0 Programmable Pipeline



Programmable pipeline