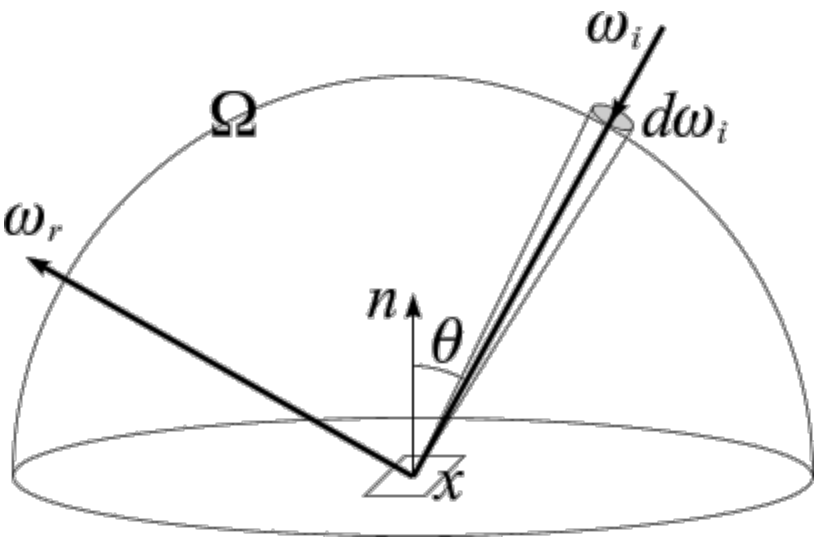
Capitolo 6
Interazione luce-materia

Diapositive a corredo del libro: "Fondamenti di Grafica Tridimensionale Interattiva"
R. Scateni, P. Cignoni, C. Montani e R. Scopigno – McGrawHill Italia

Modelli di illuminazione

- **Modello di illuminazione**: formulazione matematica dell'equazione del trasporto dell'energia luminosa
- L'equazione che risolve questo problema: **equazione di illuminazione**
- **Lighting**: calcolo del bilancio luminoso
- **Shading**: calcolo del colore di ogni pixel dell'immagine

L'equazione della radianza



$$L_o(x, \vec{\omega_r}) = L_e(x, \vec{\omega_r}) + L_r(x, \Omega)$$

$$L_o(x, \vec{\omega_r}) = L_e(x, \vec{\omega_r}) + \int_\Omega f_r(x, \vec{\omega_i}, \vec{\omega_r}) L_i(x, \vec{\omega_i})(\vec{\omega_i} \cdot \vec{n}) d\vec{\omega_i}$$

L'equazione della radianza

$$L_o(x, \vec{\omega_r}) = L_e(x, \vec{\omega_r}) + L_r(x, \Omega)$$

- La luce visibile in un punto della scena è data dalla somma della luce riflessa più la luce emessa

$$L_o(x, \vec{\omega_r}) = L_e(x, \vec{\omega_r}) + \int_\Omega f_r(x, \vec{\omega_i}, \vec{\omega_r}) L_i(x, \vec{\omega_i})(\vec{\omega_i} \cdot \vec{n}) d\vec{\omega_i}$$

- La luce riflessa è un integrale
- Somma i contributi di tutte le sorgenti luminose presenti nella scena e tiene conto dell'angolo di riflessione

L'equazione della radianza: parametri

- x punto sulla superficie in cui si calcola l'equazione;
- $\vec{\omega_r}$ direzione che unisce il punto alla posizione dell'osservatore
- $\vec{\omega_i}$ direzione da cui proviene il raggio incidente
- f_r funzione che determina la frazione riflessa di luce incidente
- $\vec{\omega_i} \cdot \vec{n}$ coseno dell'angolo di incidenza rispetto alla normale alla superficie

L'equazione della radianza

- Calcolo esatto dell’equazione della radianza: operazione complessa e molto costosa
- Sistema di grafica interattiva: formula utilizzabile per tutti i punti della scena più volte al secondo
- Semplificazione dell’equazione

Il modello di Phong

- Modello dovuto a Phong Bui-Tran, prima metà degli anni '70
- Semplifica lo schema fisico di interazione:
  - Solo sorgenti puntiformi
  - No inter-riflessioni
  - Calcolo locale dell'equazione di illuminazione
  - Approssimazione con due costanti della funzione di riflessione

Il modello di Phong

- Simula il comportamento di materiali opachi
- Non modella la rifrazione: no materiali trasparenti o semi-trasparenti
- Visione complessiva dominata dall'animazione
- Non adatto per immagini singole (necessitano di modelli globali)

Il modello di Phong

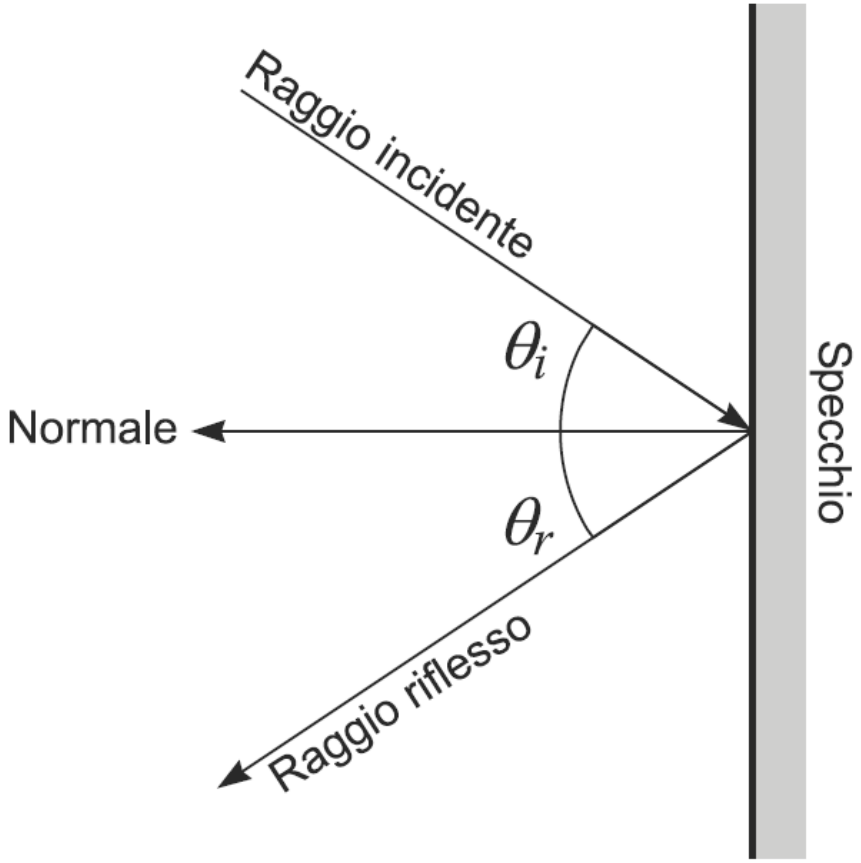
- Le formule che seguono *banda cromatica*: produzione di un'immagine a diversi livelli di intensità (toni di grigio) piuttosto che diversi colori
- Quando si utilizza una rappresentazione a colori RGB l'equazione viene calcolata in modo indipendente per ciascuna delle tre componenti cromatiche

Riflessione speculare e diffusa (Phong)

- **Obiettivo**: approssimare il termine f_r dell'equazione della radianza
- **Metodo**: semplificazione del fenomeno della rieflessione usando le leggi della fisica che regolano la riflessione speculare (Fresnel) e la riflessione diffusa (Lambert)

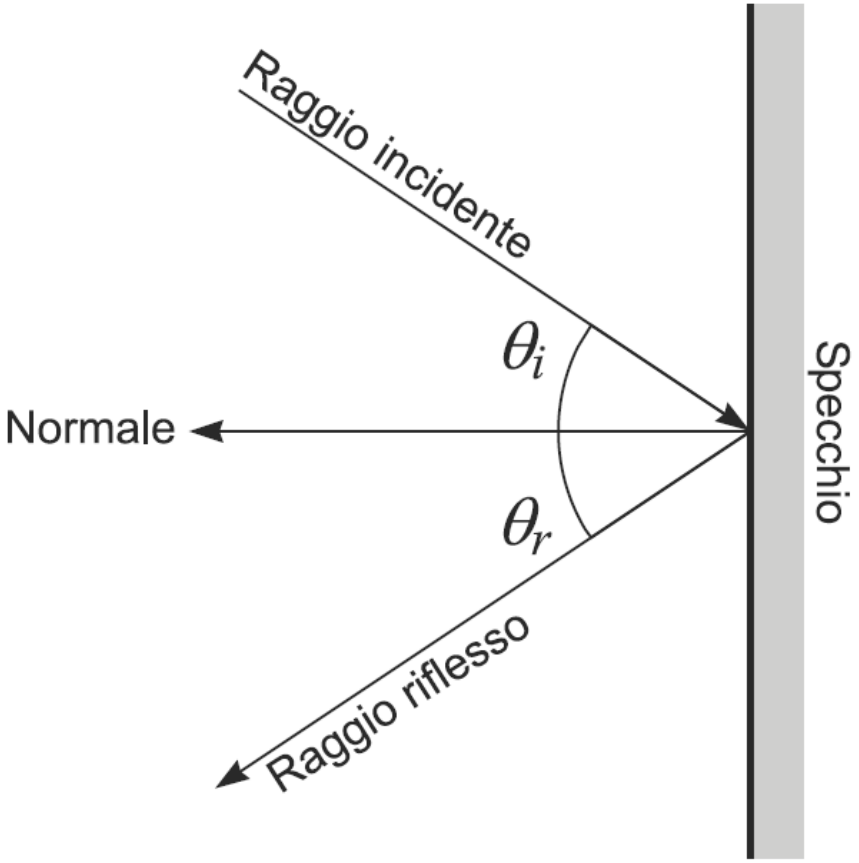
Legge di Fresnel

- Quando un raggio di luce passa da un mezzo ad un altro con diverso indice di rifrazione raggiunta la superficie di separazione parte del raggio viene riflessa e parte trasmessa
- La somma delle energie dei due raggi è uguale all'energia del raggio originale



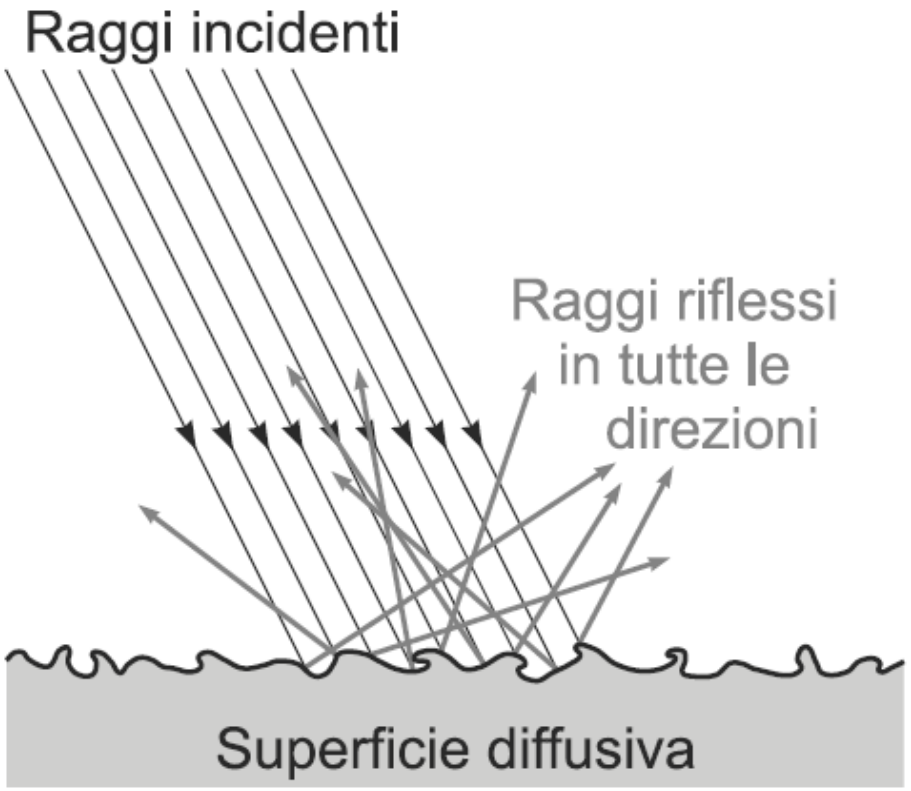
Legge di Fresnel

- Se da aria a corpo solido non c'è rifrazione si ha solo riflessione
- L'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione
- Vale per materiali molto lisci e lucidi



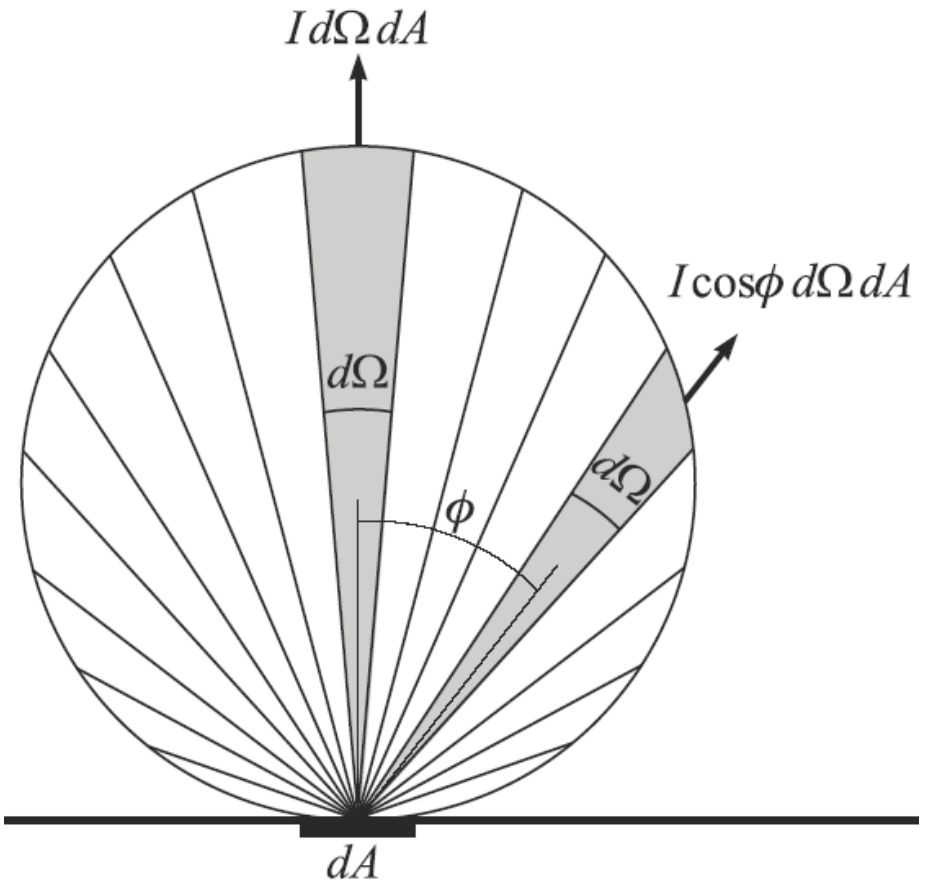
Legge di Lambert

- Materiali molto opachi (es. gesso e legno) hanno una superficie che, a livello microscopico, ha piccole sfaccettature che riflettono la luce in una direzione casuale



Legge di Lambert

- Integrando su scala macroscopica: la luce si riflette uniformemente verso tutte le direzioni, con intensità proporzionale al rapporto tra la direzione del raggio incidente e la normale alla superficie in quel punto



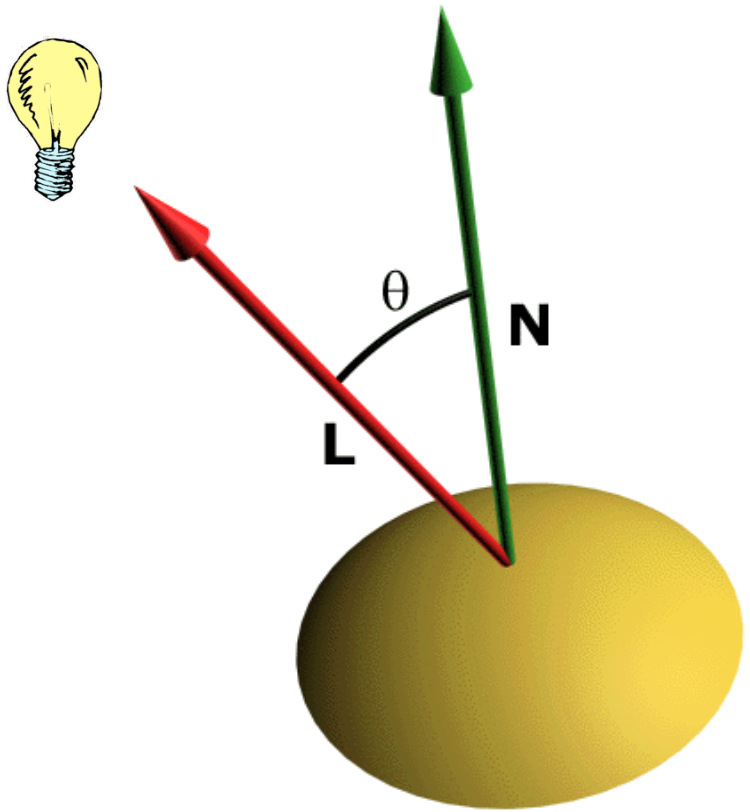
Modellazione della riflessione diffusiva

- Sorgenti luminose puntiformi:
  - posizione nella scena
  - intensità della luce emessa
- Per calcolare in P con normale $\vec{\mathbf{N}}$:

$$\vec{\mathbf{L}} = |L - P|$$

- Dipendenza solo da θ

$$cos(\theta) = \vec{\mathbf{L}} \cdot \vec{\mathbf{N}}$$



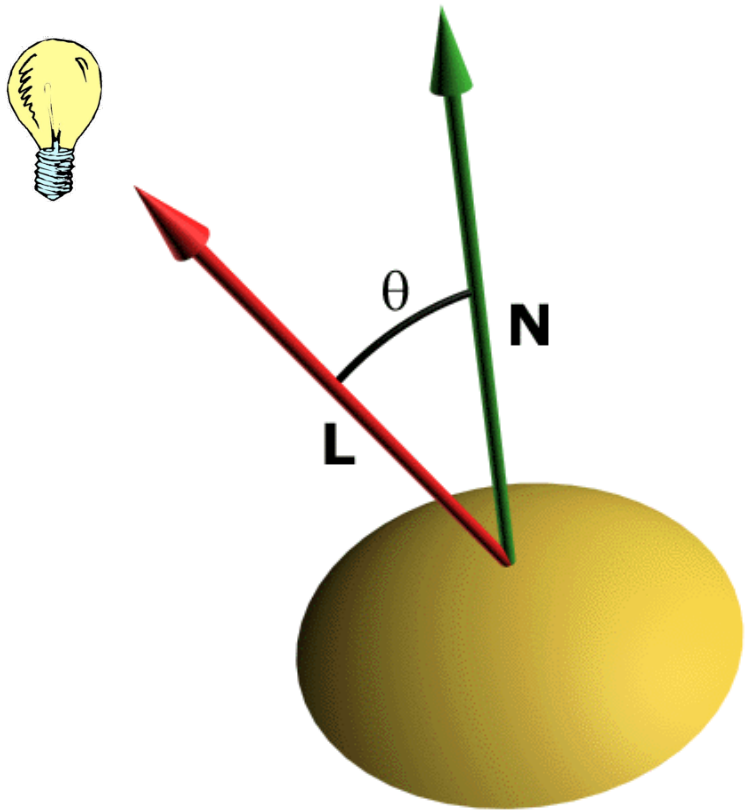
Modellazione della riflessione diffusiva

- Si approssima la funzione di riflessione diffusa della superficie come una costante k_d dipendente dal materiale
- Equazione di illuminazione (solo diffusiva)

$$I = I_p k_d \cos\theta$$

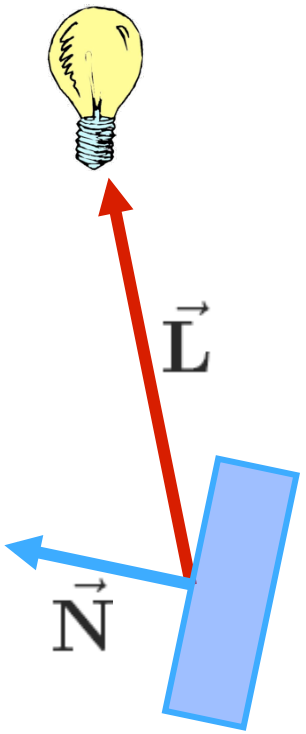
o meglio

$$I = I_p k_d (\vec{\mathbf{N}} \cdot \vec{\mathbf{L}})$$

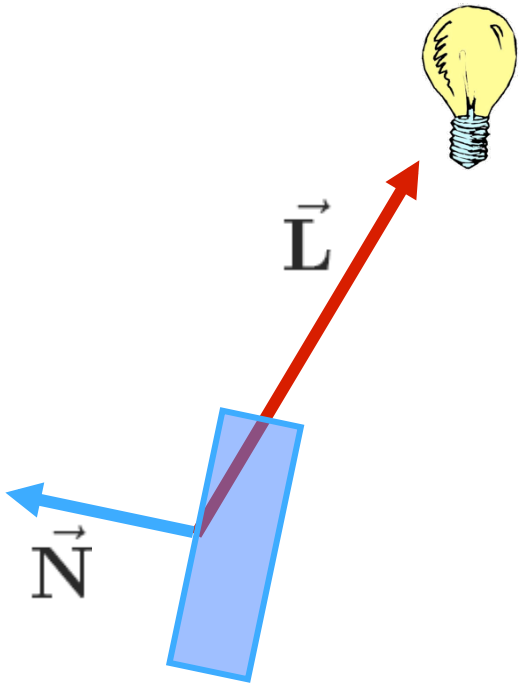


Modellazione della riflessione diffusiva

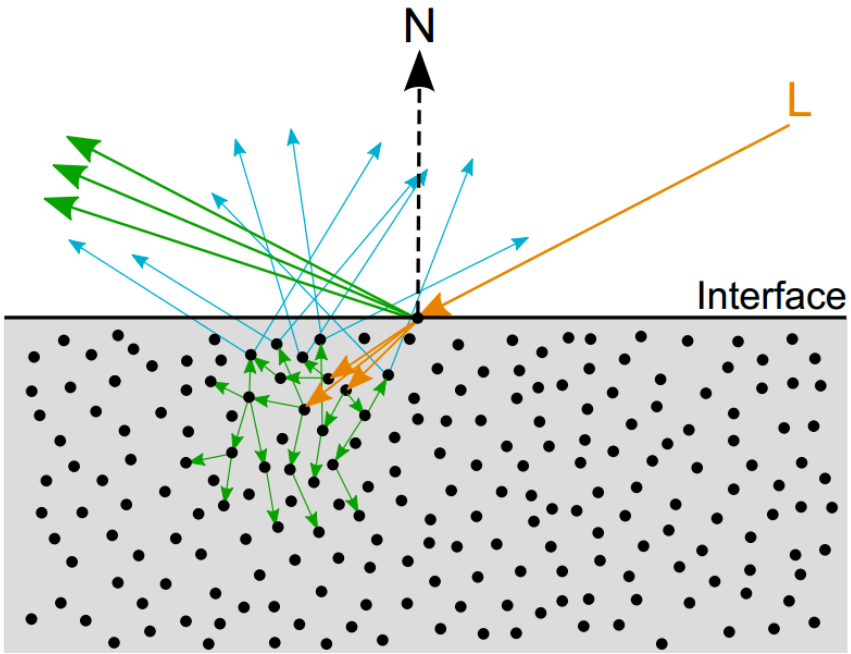
- Si considera solo per valori di θ compresi tra 0 e $\pi/2$

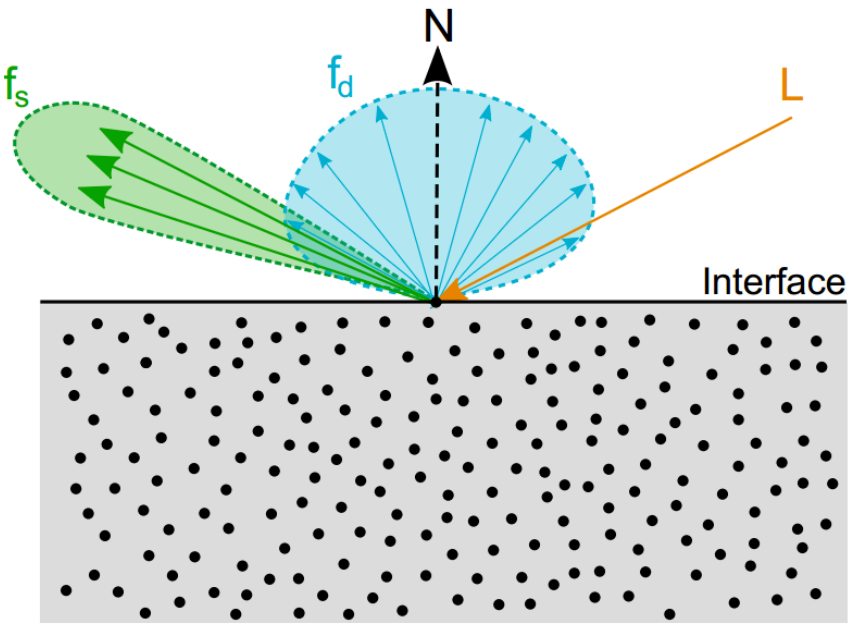


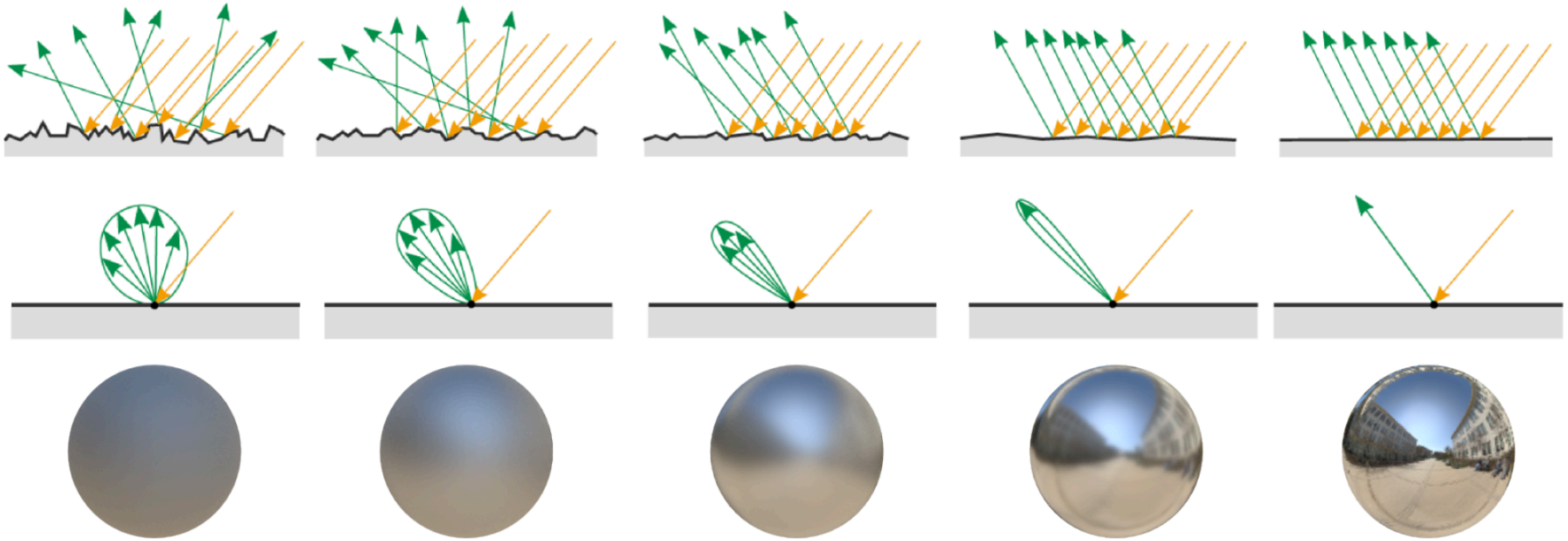
OK



NO

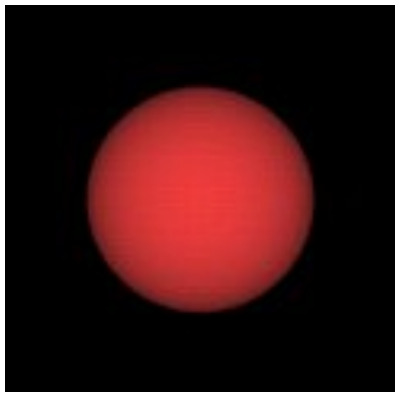

N
L
Interface

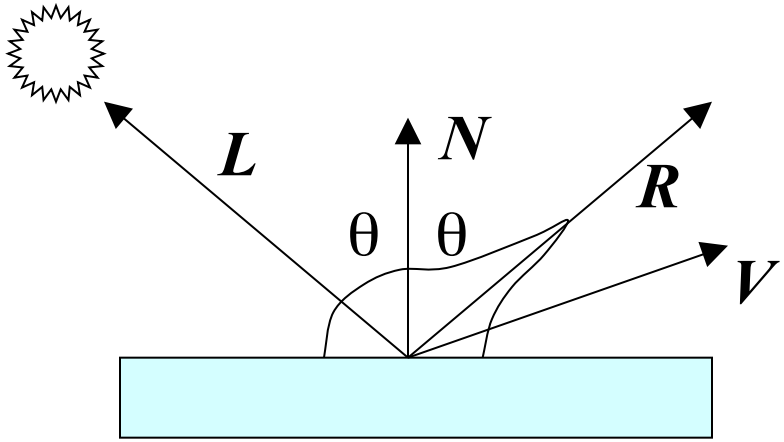

N
f_s
f_d
L
Interface

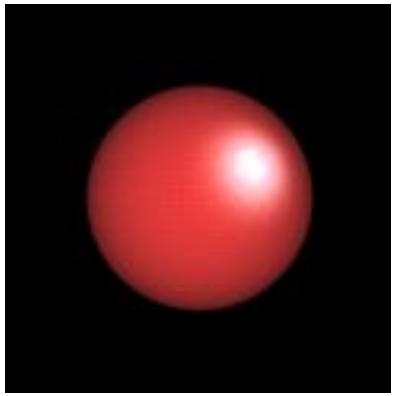


Modellazione della riflessione speculare

- Novità sostanziale: *riflettore non perfetto*



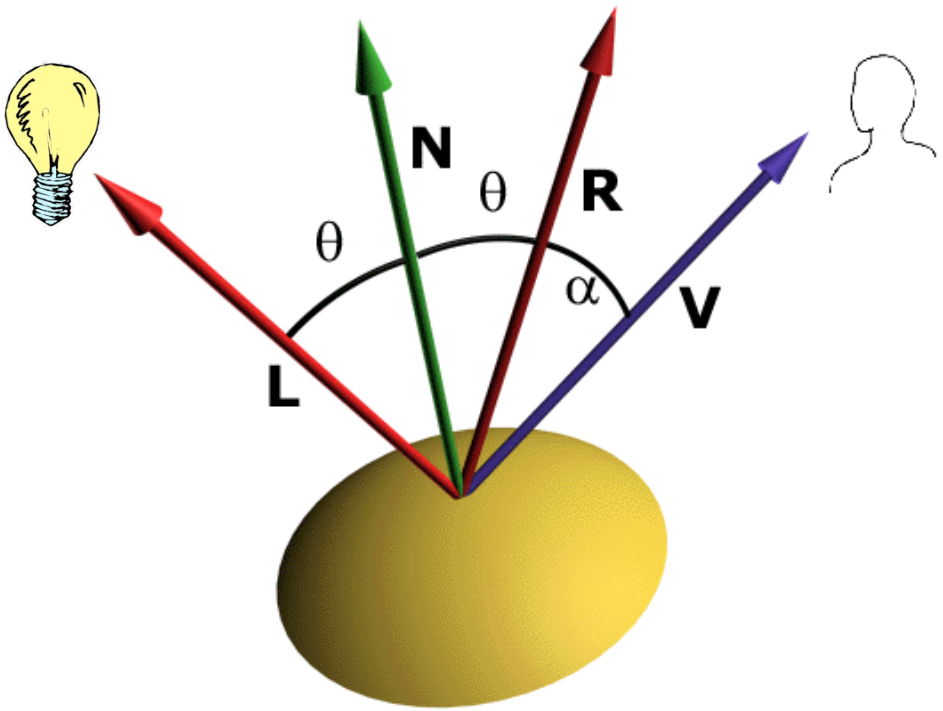




- Approssimazione empirica di una riflessione più realistica rispetto alla legge di Fresnel
- Conseguenza: *specular highlight*

Modellazione della riflessione speculare

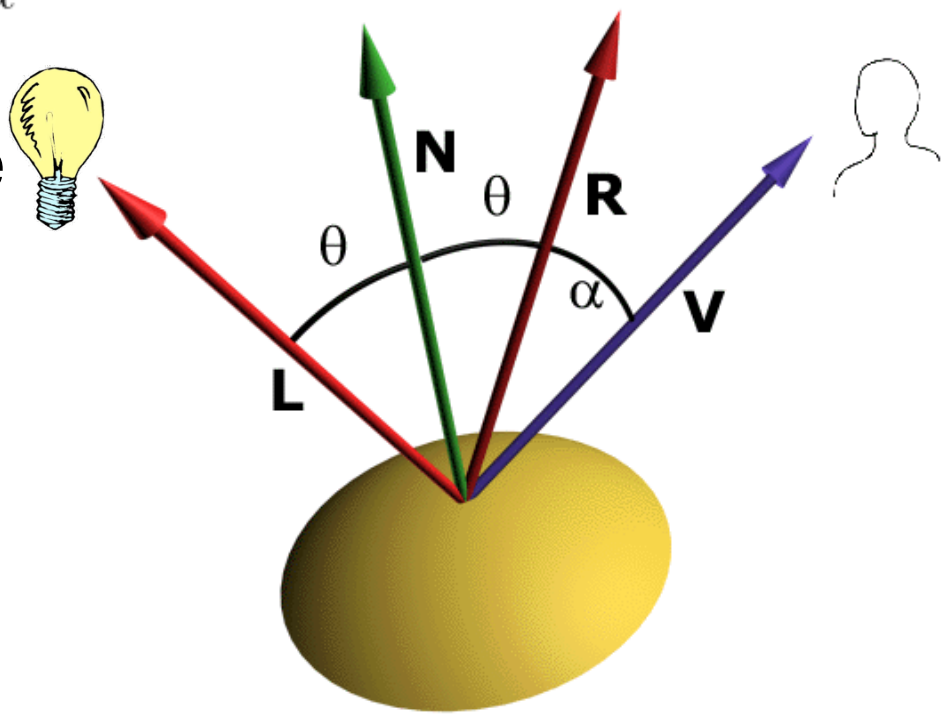
- Dipendenza dall'angolo α compreso tra la direzione di riflessione ideale e la direzione di vista
- Riflessione massima per $\alpha = 0$
- Decadimento più o meno rapido all'aumentare di α



Modellazione della riflessione speculare

- Questo comportamento si modella elevando alla n il coseno dell'angolo α
- Il parametro n è detto esponente di riflessione speculare (*specular reflection exponent*) del materiale
- Il vettore $\vec{\mathrm{R}}$ si calcola

$$\vec{\mathrm{R}} = 2\vec{\mathrm{N}}(\vec{\mathrm{N}} \cdot \vec{\mathrm{L}}) - \vec{\mathrm{L}}$$

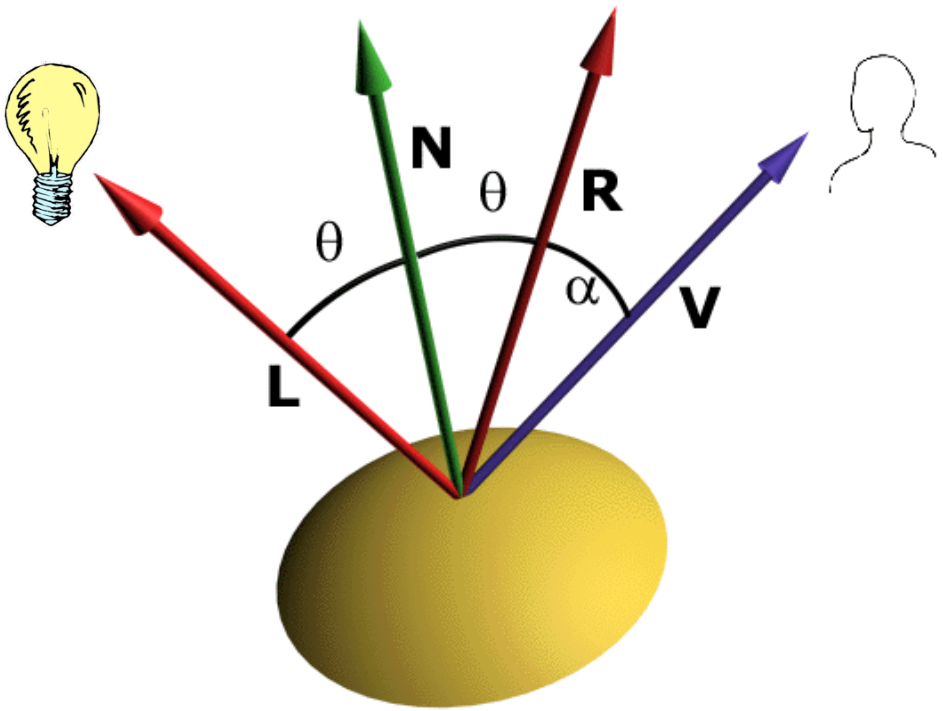


Modellazione della riflessione speculare

- Equazione di illuminazione (solo speculare)

$$I = I_p k_s \cos^n \alpha$$

- Parametro k_s modella il comportamento della superficie insieme a n



Modellazione della componente ambientale

- Le inter-riflessioni tra oggetti diversi nella scena non sono modellate in modo accurato dal modello di Phong
- Sono approssimate dalla componente:

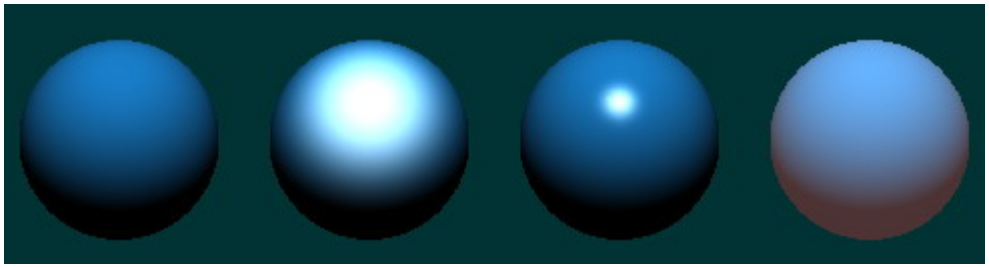
$$I = I_a k_a$$

- I_a modella la radiazione luminosa totale emessa nella scena
- k_a modella la rieflettività del materiale
- I_a è costante per tutti i punti di tutti gli oggetti

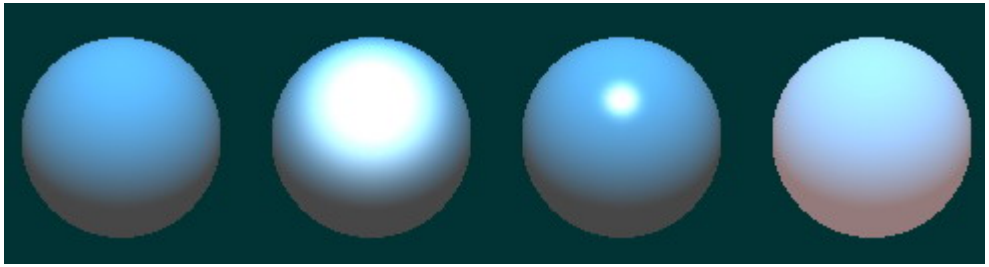
Modellazione della componente ambientale

- La componente ambientale aggiunge realismo alla scena

Senza

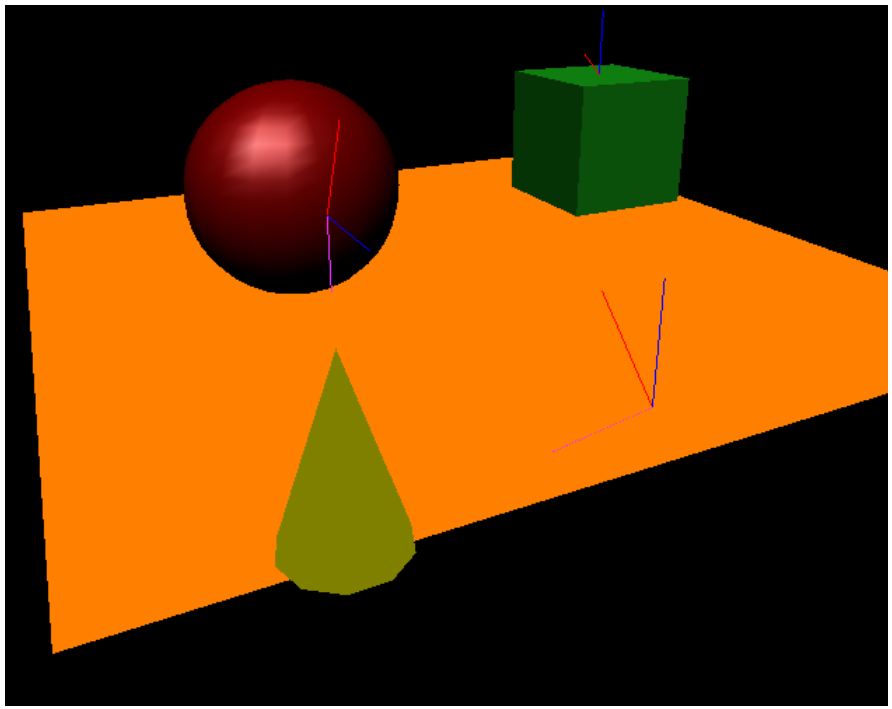


Con

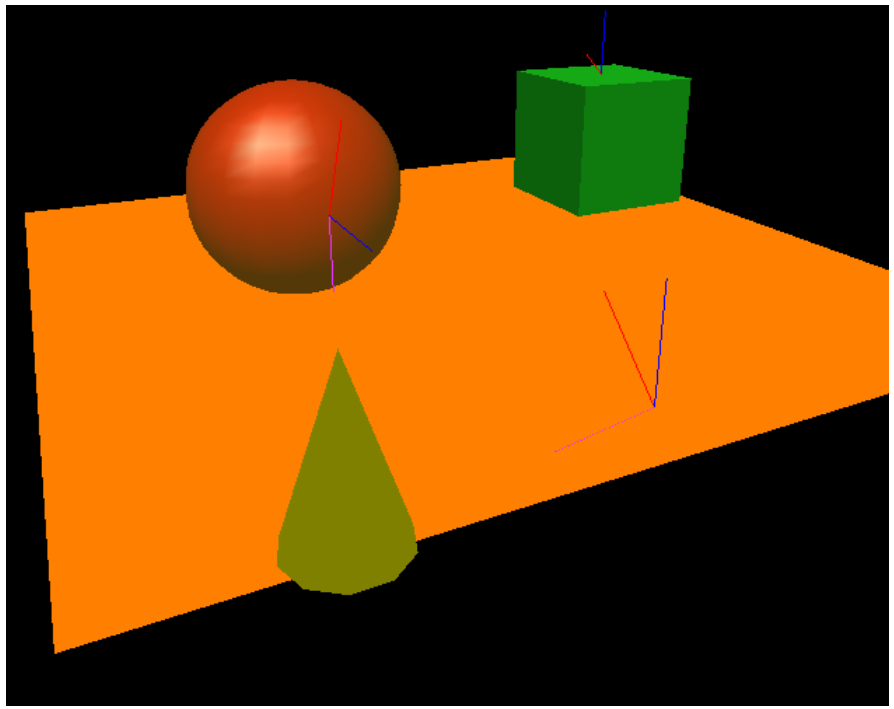


Modellazione della componente ambientale

- La componente ambientale aggiunge realismo alla scena



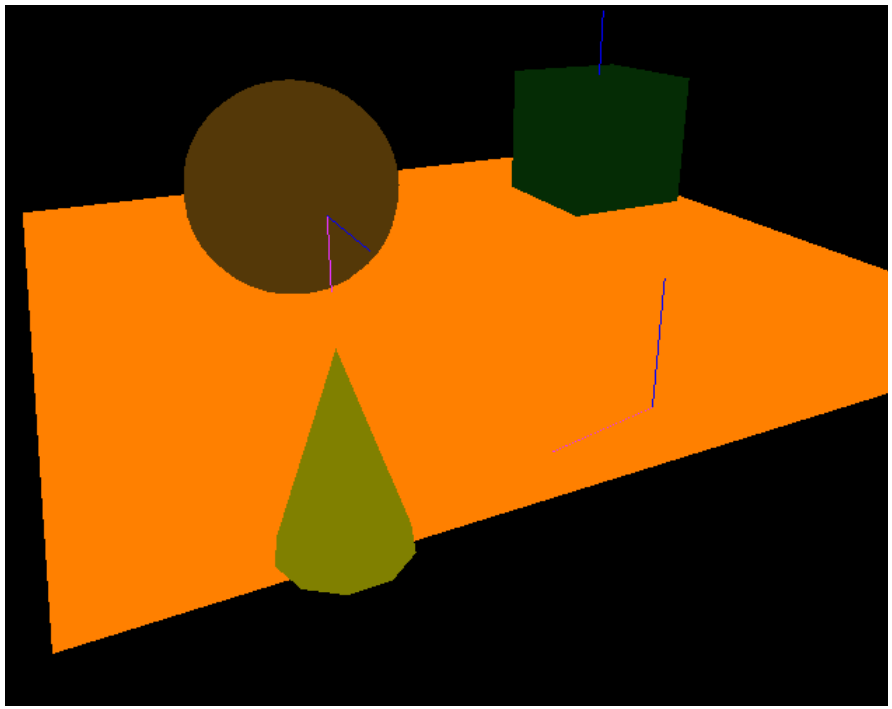
Senza



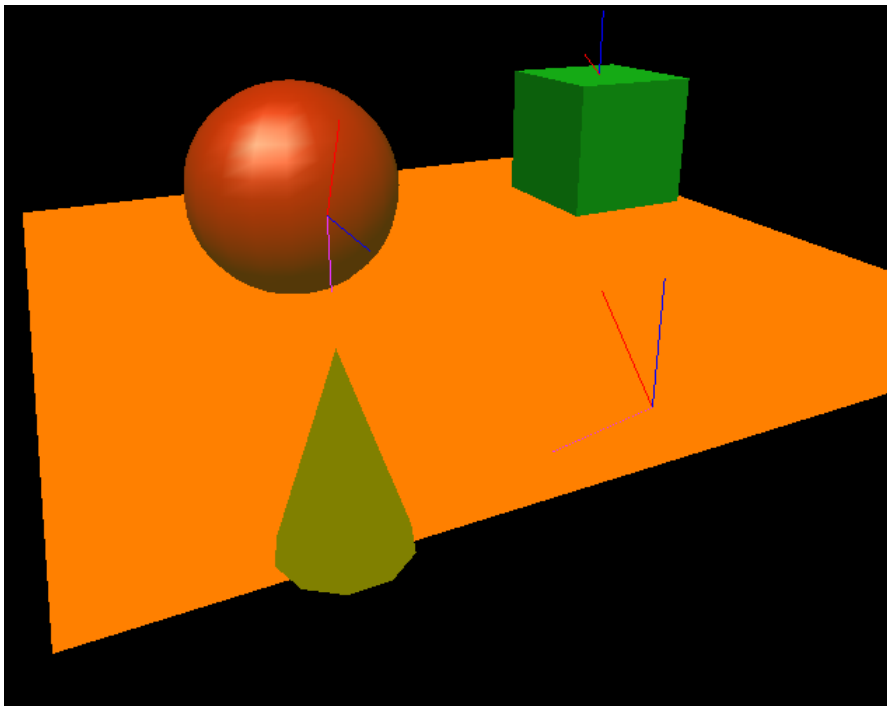
Con

Modellazione della componente ambientale

- Ma da sola non basta!



Solo ambientale



Con riflessioni

Mettere tutto insieme

- Tutti i contributi descritti si vanno a sommare per calcolare l'equazione di illuminazione
- Sommatoria su tutte le sorgenti luminose presenti nella scena

$$I = I_a k_a + \sum_p I_p [k_d(\vec{\mathbf{N}} \cdot \vec{\mathbf{L}}) + k_s(\vec{\mathbf{R}} \cdot \vec{\mathbf{V}})^n]$$

Mettere tutto insieme + attenuazione

- Si può tenere conto dell'attenuazione dell'intensità dell'illuminazione all'aumentare della distanza

$$f_{\text{att}} = \begin{cases} \frac{1}{c_1 + c_2 d_L + c_3 d_L^2} & \text{se } \frac{1}{c_1 + c_2 d_L + c_3 d_L^2} < 1 \\ 1 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

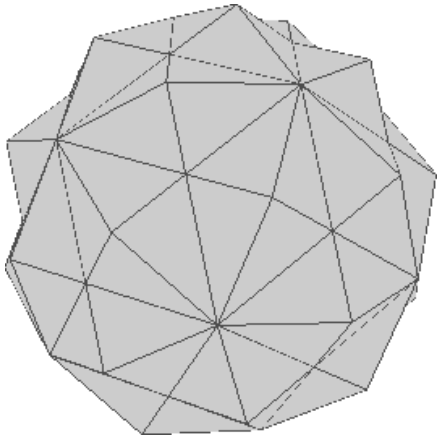
- Inserendo il fattore di attenuazione

$$I = I_a k_a + \sum_p f_{\text{att}_p} I_p [k_d (\vec{\mathbf{N}} \cdot \vec{\mathbf{L}}) + k_s (\vec{\mathbf{R}} \cdot \vec{\mathbf{V}})^n]$$

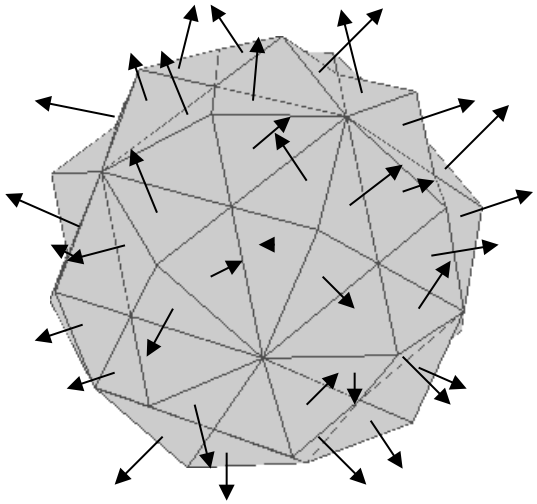
Tecniche di shading

- Il modello di Phong descrive *come* deve essere calcolata l'interazione tra luce e materia
- Dobbiamo capire *dove* calcolare l'equazione d'illuminazione
- Sistema interattivo ⇨ generazione di un certo numero di frame per secondo ⇨ metodi approssimati

Shading costante

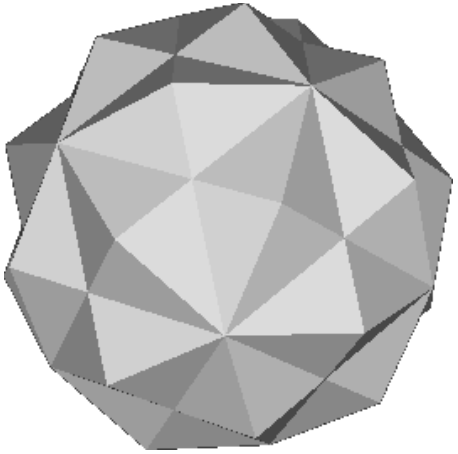


Dato l'oggetto per cui calcolare l'equazione di illuminazione I ...



...calcolare le normali in ogni faccia...

...e calcolo I una sola volta per faccia



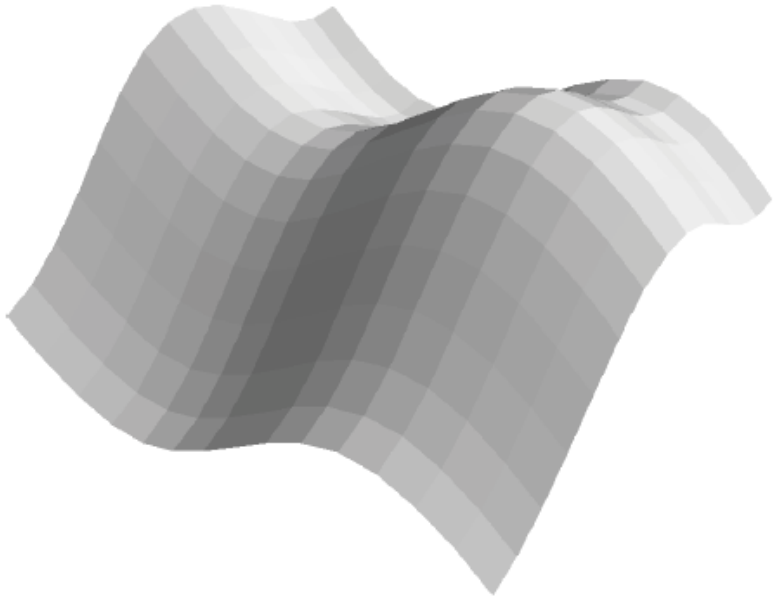
Shading costante

- Se:
  - sorgenti luminose solo direzionali ($\vec{\mathbf{N}} \cdot \vec{\mathbf{L}} = k$ per tutta la superficie)
  - osservatore a distanza infinita dalla scena (proiezione parallela) ⇨ $\vec{\mathbf{N}} \cdot \vec{\mathbf{V}} = k$ e $\vec{\mathbf{R}} \cdot \vec{\mathbf{V}} = k$ per tutta la superficie

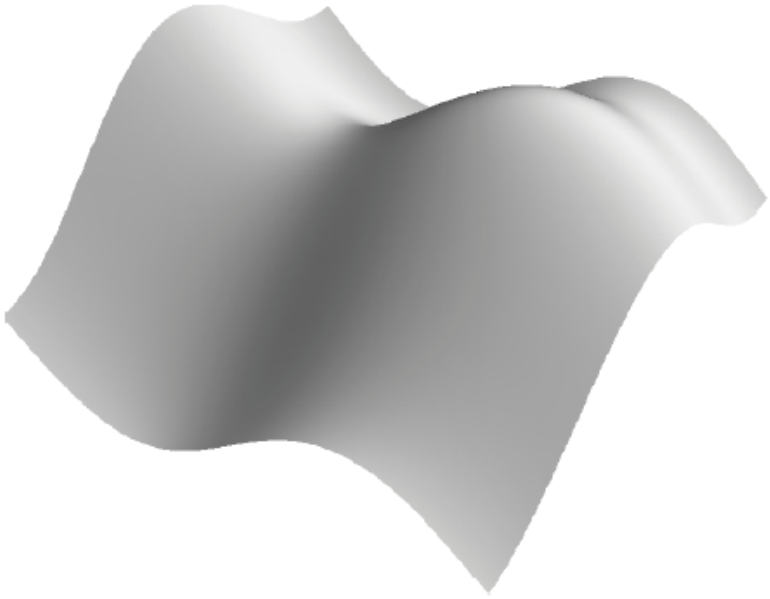
il metodo è la migliore approssimazione possibile

Shading costante

- Problema: il modello discreto rappresenta in modo approssimato una superficie curva e continua



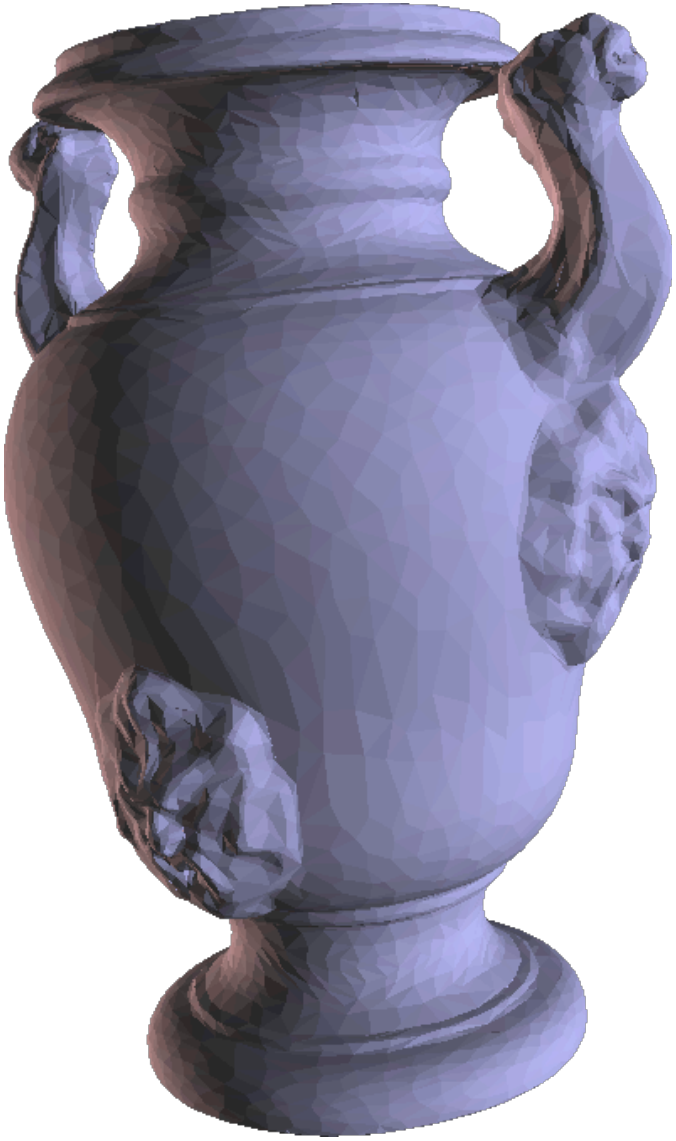
Com'è



Come dovrebbe essere

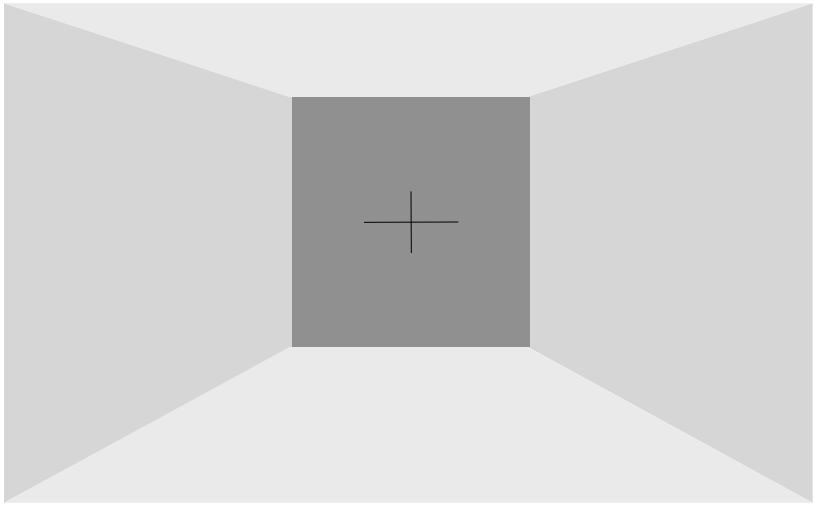
Shading costante

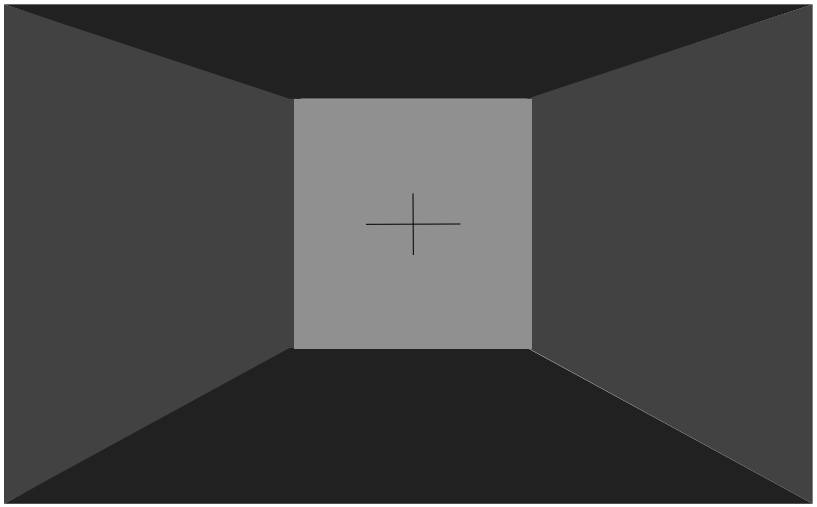
- Soluzione: uso un numero elevato di facce
- Non funziona, si vedono comunque le discontinuità tra una faccia e la vicina



Mach banding

- Alterazione della percezione visiva di una zona in cui la luminanza varia rapidamente
- Un oggetto messo vicino ad uno più chiaro risulta più scuro e messo vicino ad uno più scuro risulta più chiaro



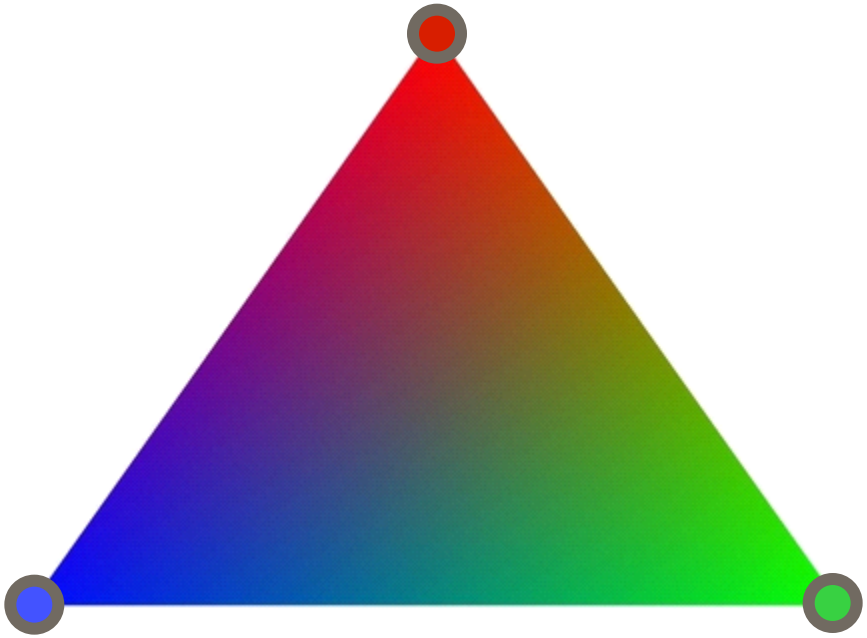


Gouraud shading

- Proprietà fondamentale dello spazio colore RGB: linearità
- Il valore colore intermedio tra due colori dati nello spazio RGB si calcola per interpolazione lineare
- Interpolazione separata sulle tre componenti R, G, e B

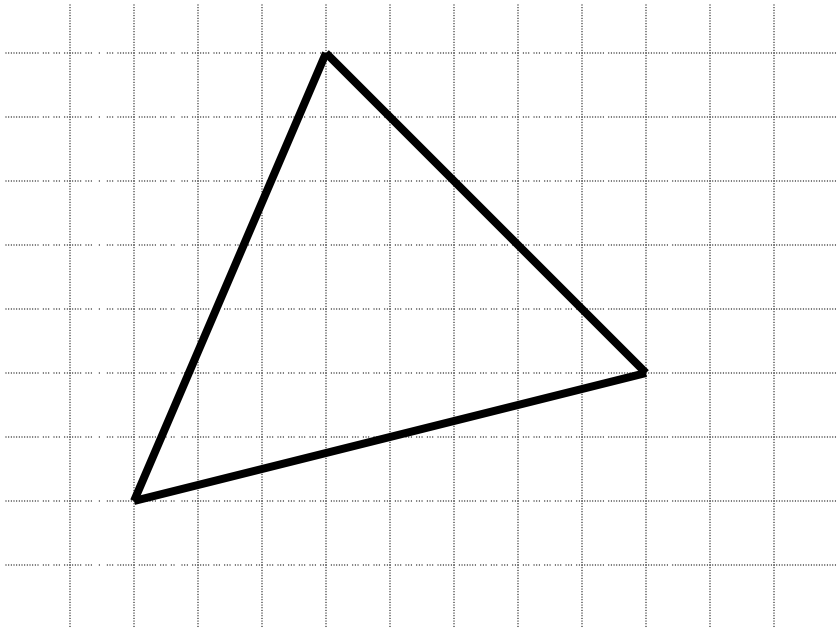
Gouraud shading

- Calcolare l'equazione di illuminazione solo in alcuni punti nodali
- Interpolare linearmente tra questi valori



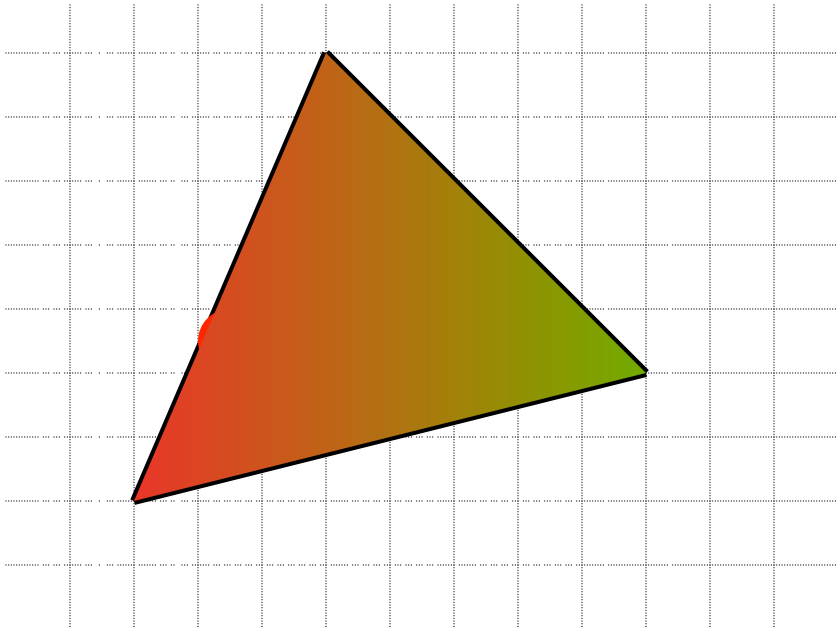
Gouraud shading

- Aggiungere all'algoritmo di rasterizzazione l'operazione di interpolazione nello spazio colore comporta uno sforzo minimo



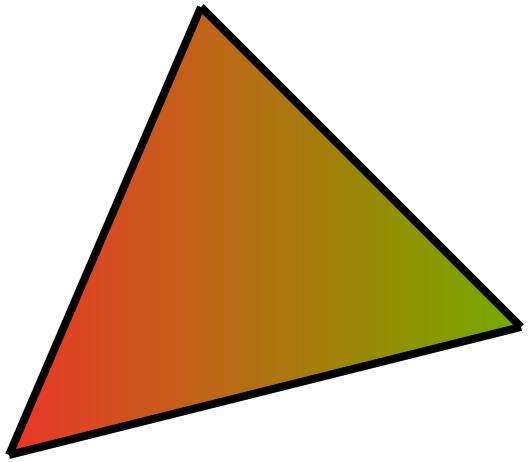
Gouraud shading

- Per ogni span si calcola il valore di I all'estremo con un algoritmo incrementale, e, sempre incrementalmente, si calcolano i valori all'interno della span



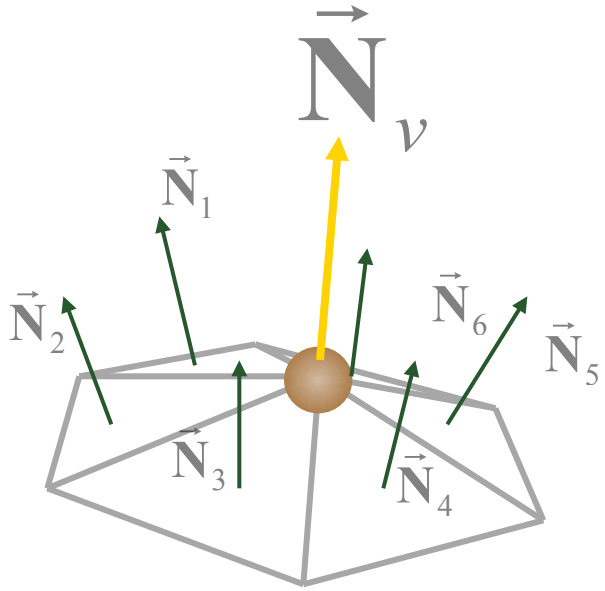
Gouraud shading

- Il risultato così ottenuto approssima molto il modello di Phong per superfici generiche rispetto allo shading costante



Gouraud shading

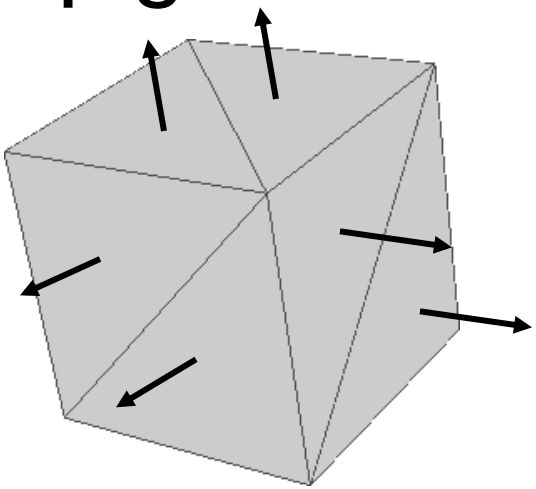
- Che normali utilizzo?
- La normale alla faccia è bene definita
- La normale al vertice la calcolo come media delle normali delle facce che insistono sul vertice

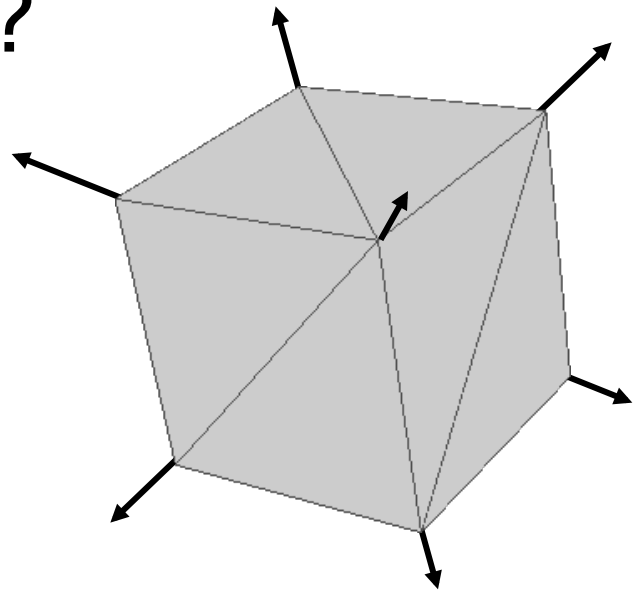


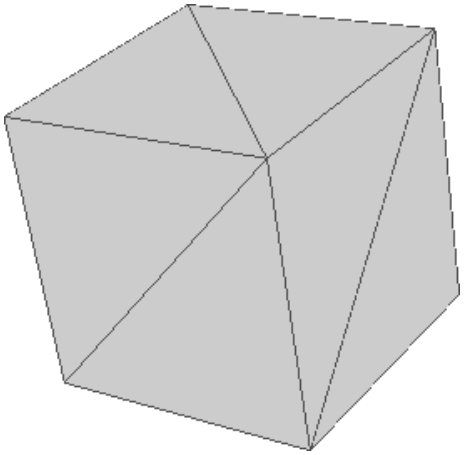
$$\vec{\mathbf{N}}_v = \frac{\sum_i \vec{\mathbf{N}}_i}{|\sum_i \vec{\mathbf{N}}_i|}$$

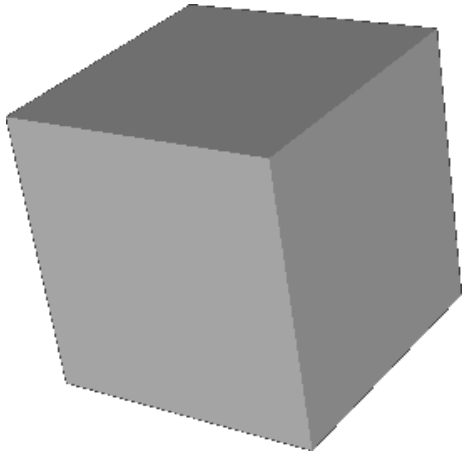
Gouraud shading

- Problema: gli spigoli “veri”?

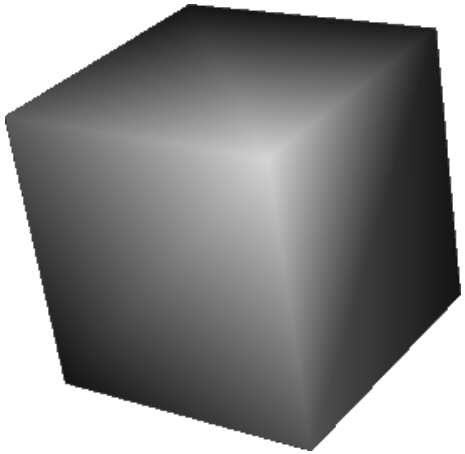








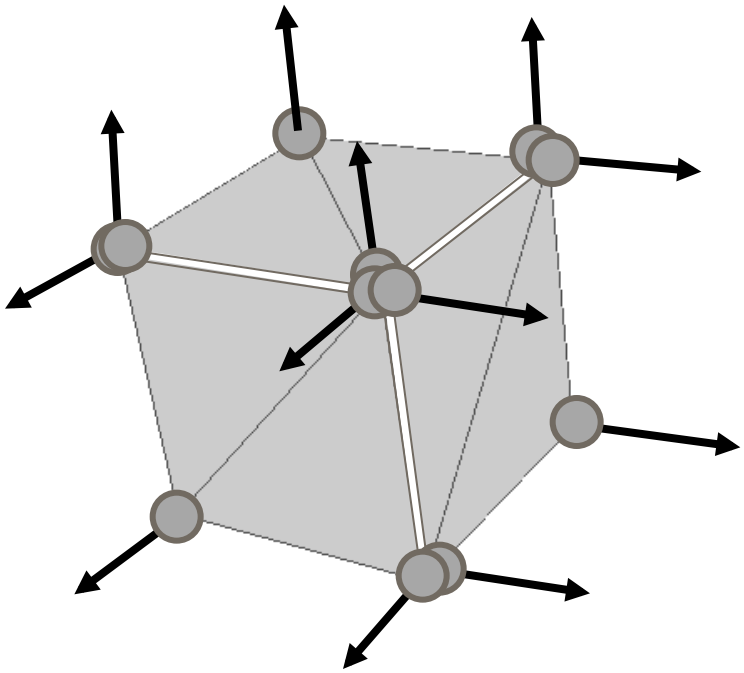
shading costante



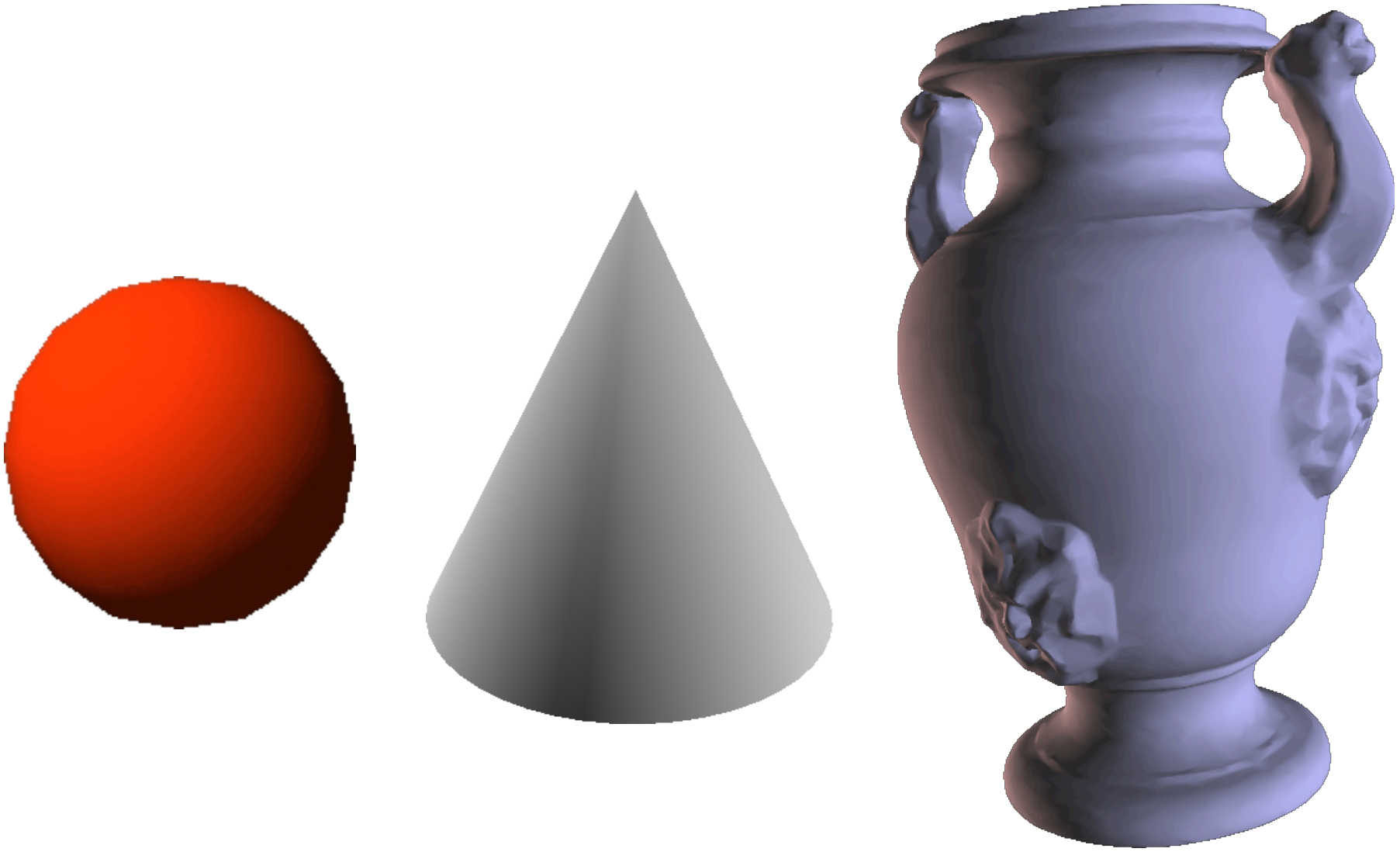
Gouraud shading

Gouraud shading

- Soluzione: si utilizzano normali diverse per i due lati dello spigolo
- La struttura dati deve memorizzare le adiacenze e le diverse tipologie



Paragone: costante e Gouraud

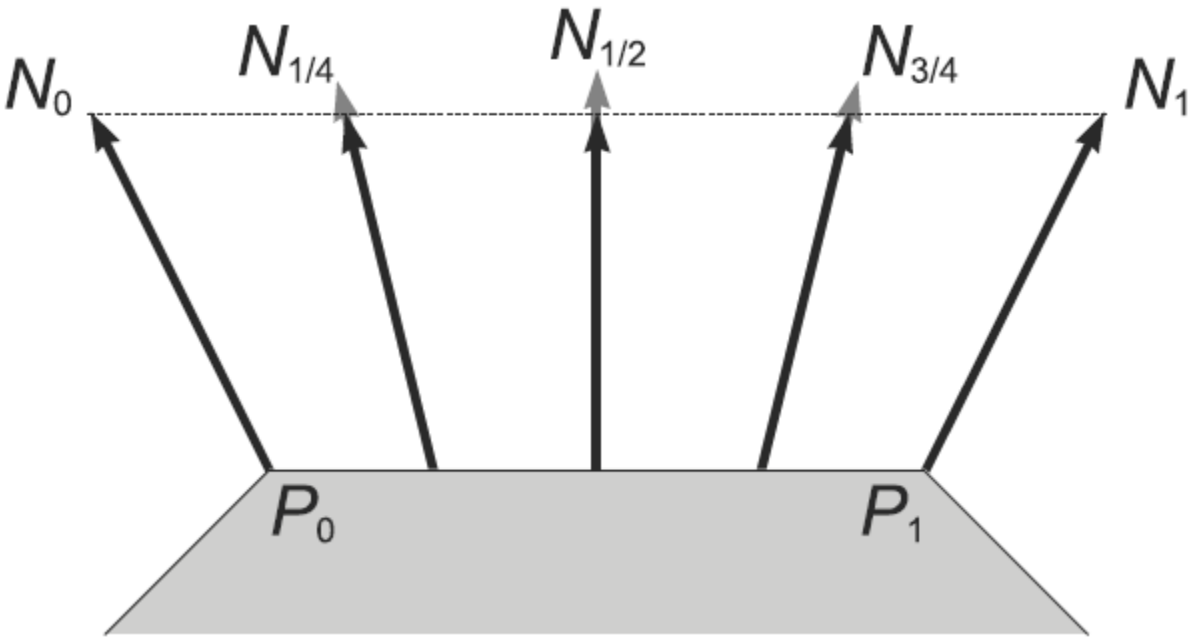


Phong shading

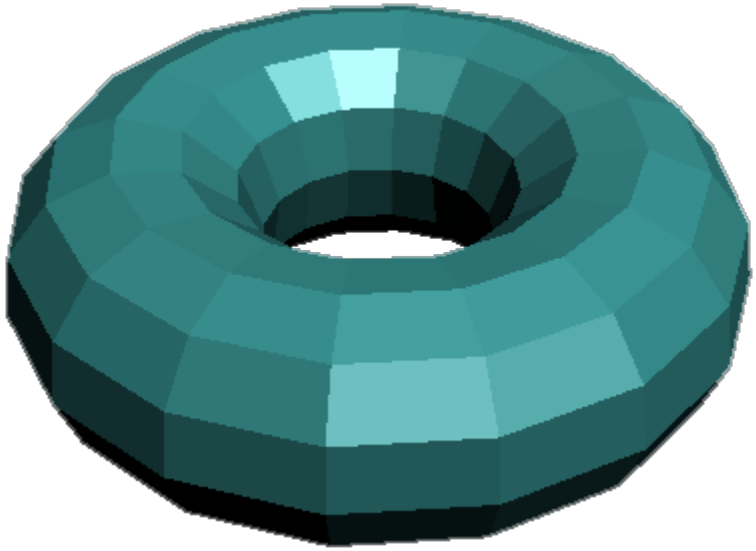
- Gouraud shading: ottimale rapporto qualità/prezzo
- Risultati non eccezionali per superfici dotate di un alto coefficiente di riflessione speculare
- Problema: per n alto lo *specular highlight* deve essere piccolo, invece si “propaga” per tutta la faccia (per interpolazione) se cade vicino a un vertice, si “perde” se è interno

Phong shading

- Soluzione: si interpola nello spazio delle normali e si calcola l'equazione di illuminazione in ogni pixel

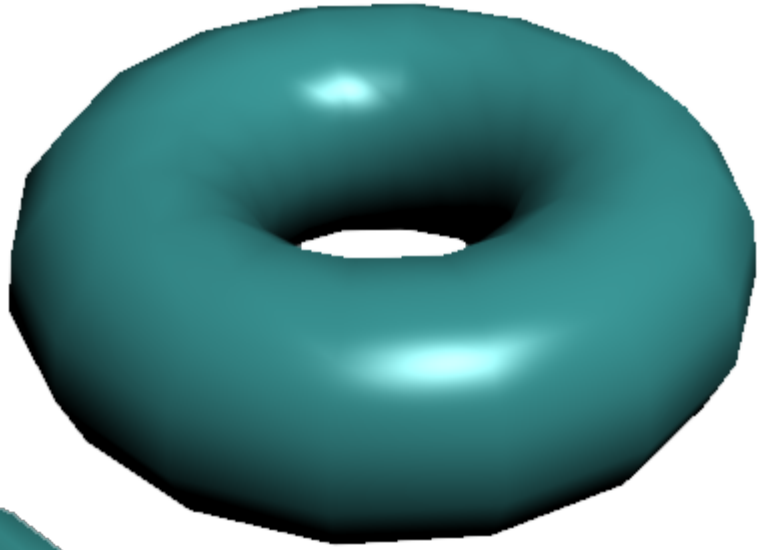


Paragone: costante, Gouraud e Phong



Costante

Phong



Gouraud

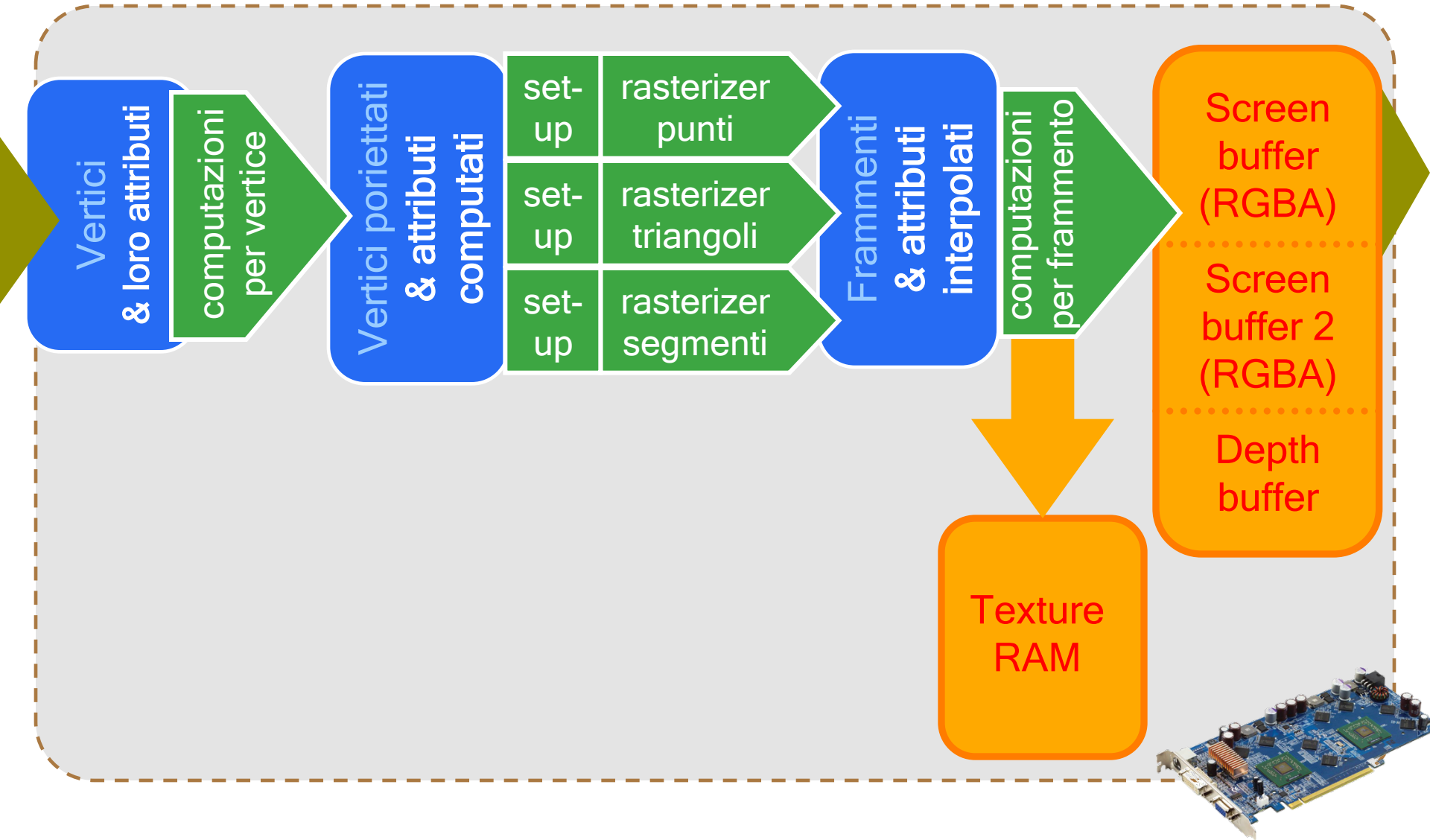
Texture mapping

- Shading: funziona finché modello geometrico ha complessità della composizione del materiale
- La descrizione di un materiale non uniforme è corretta a partire da una rappresentazione geometrica con suddivisione (*tassellazione*) in primitive collegata alle discontinuità del materiale da rappresentare
- Altrimenti? Texture mapping!

Texture mapping

- Shading: funziona finché modello geometrico ha complessità della composizione del materiale
- La descrizione di un materiale non uniforme è corretta a partire da una rappresentazione geometrica con suddivisione (tassellazione) in primitive collegata alle discontinuità del materiale da rappresentare
- Altrimenti? Texture mapping!

Memoria RAM nelle schede grafiche



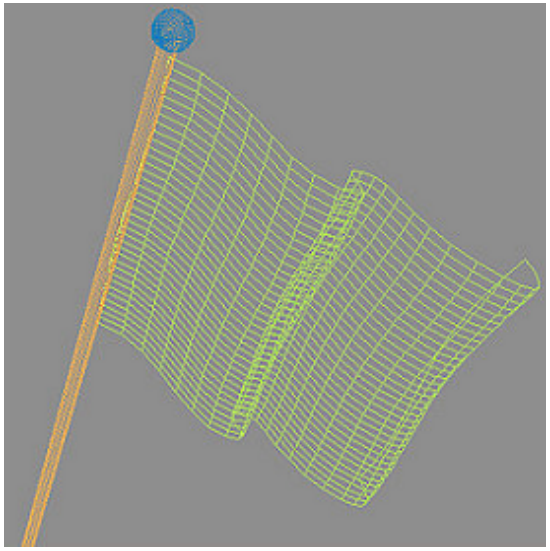
Texture Mapping

- Nelle operazioni per frammento si può accedere ad una RAM apposita: la Texture RAM strutturata in un insieme di Textures (“tessiture”)
- Ogni tessitura è un array 1D, 2D o 3D di Texels (campioni di tessitura) dello stesso tipo

Texels

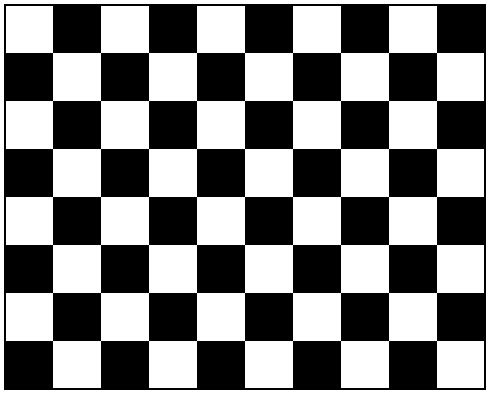
- Sono esempi di texels:
  - Ogni texel un colore (componenti: R-G-B, o R-G-B-A): la tessitura è una “color-map”
  - Ogni texel una componente alpha: la tessitura è una “alpha-map”
  - Ogni texel una normale (componenti: X-Y-Z): la tessitura è una “normal-map” o “bump-map”
  - Ogni texel contiene un valore di specularità: la tessitura è una “shininess-map”

Rimappare immagini sulla geometria



geometria 3D
(mesh di quadrilateri)

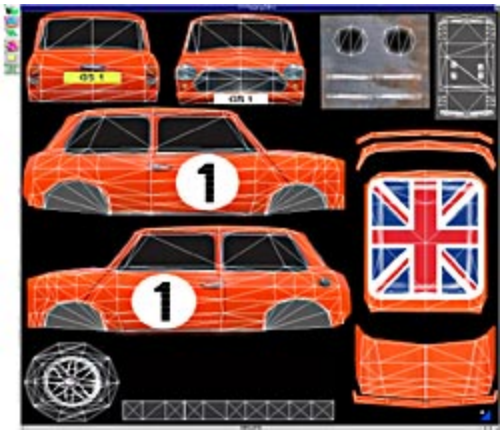
+



RGB texture 2D
(color-map)

=

Rimappare immagini sulla geometria



Rimappare immagini sulla geometria

+

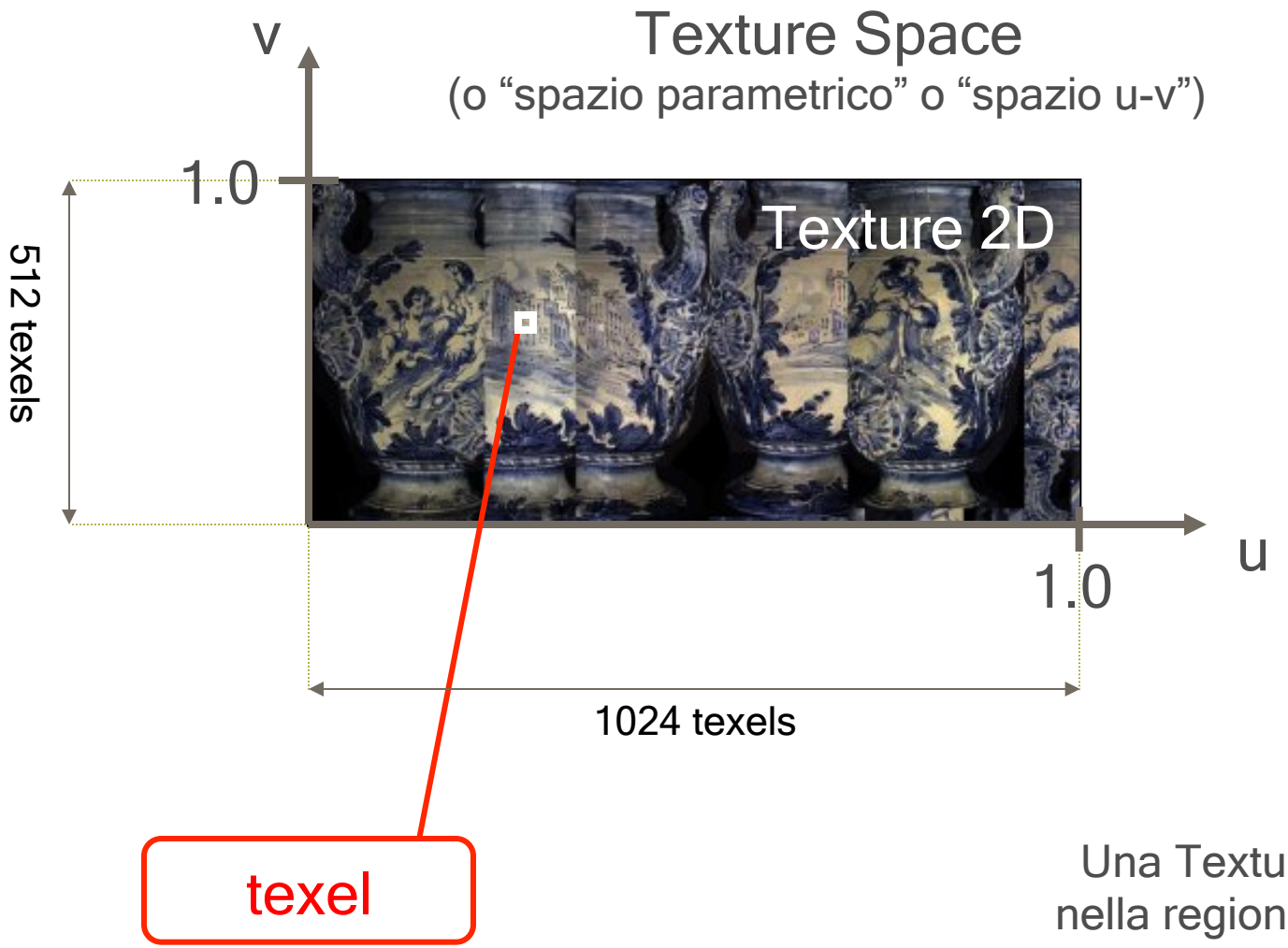
=

Texture Mapping: storia

Ed Catmull

- 1974 introdotto da Ed Catmull
  - nella sua Phd Thesis
- Solo nel 1992 (!) si ha texture mapping in hardware
  - Silicon Graphics RealityEngine
- Dal 92 a oggi ha avuto aumento rapidissimo della diffusione
  - strada intrapresa soprattutto da low end graphic boards
- Oggi è una delle più fondamentali tecniche di rendering
  - Il re indiscusso delle tecniche image based

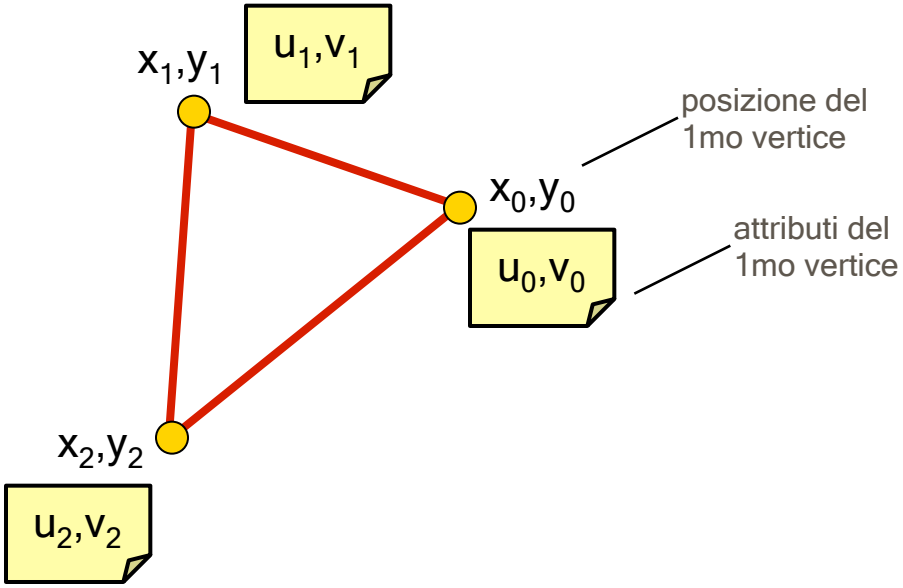
Notazione



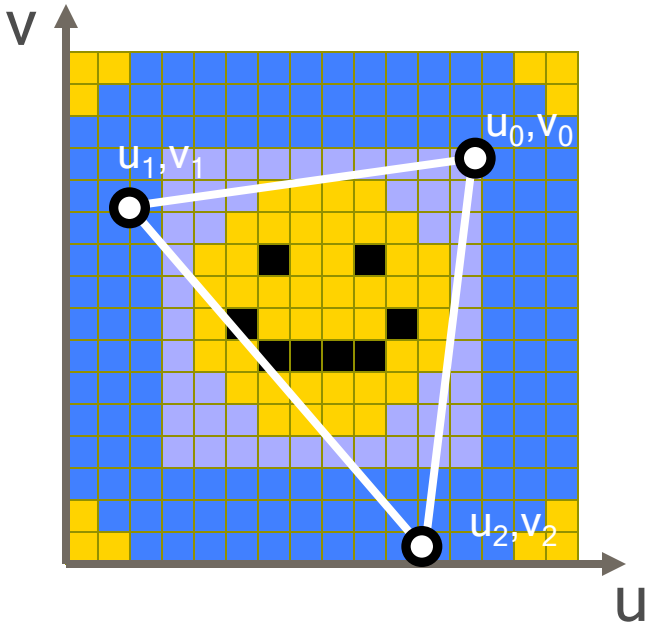
Una Texture è definita nella regione [0,1] x [0,1] dello “spazio parametrico”

Texture Mapping

- Ad ogni vertice (di ogni triangolo) assegno le sue coordinate *u,v* nello spazio tessitura



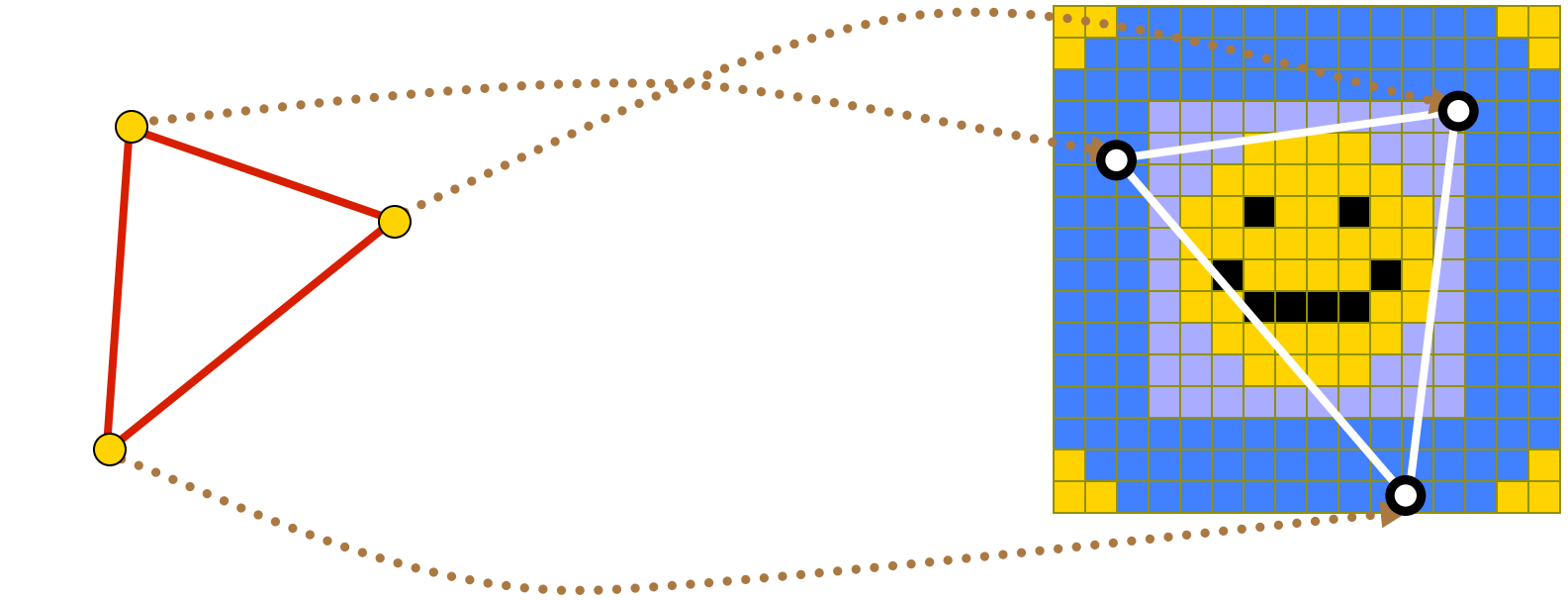
Screen Space



Texture Space

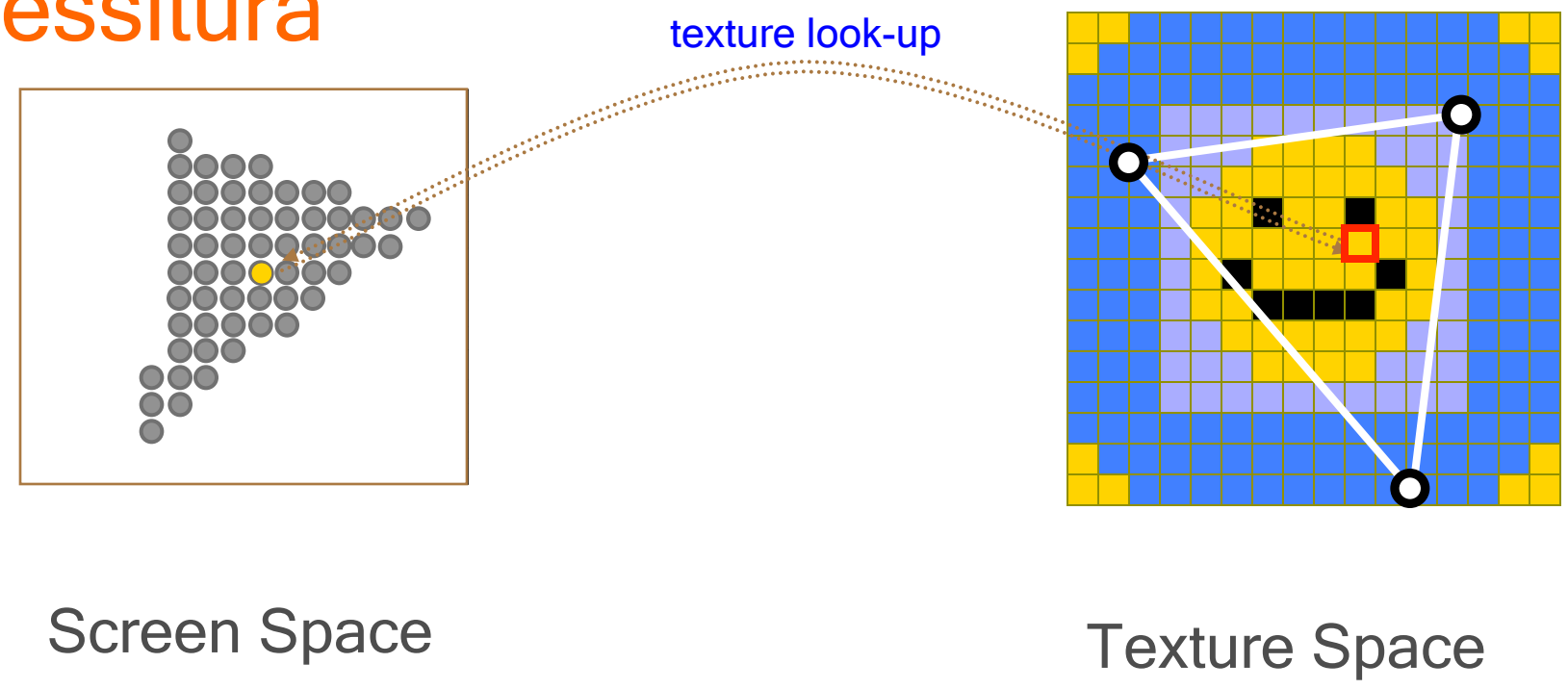
Texture Mapping

- Così in pratica definisco un mapping fra il triangolo e un triangolo di tessitura



Texture Mapping

- Ogni vertice (di ogni triangolo) ha le sue coordinate *u,v* nello spazio tessitura



Texture Mapping

Vertici & loro attributi

computazioni per vertice

Vertici proiettati & attributi computati

set-up

set-up

set-up

rasterizer punti

rasterizer triangoli

rasterizer segmenti

Frammenti & attributi interpolati

computazioni per frammento

Screen buffer

texture look-up

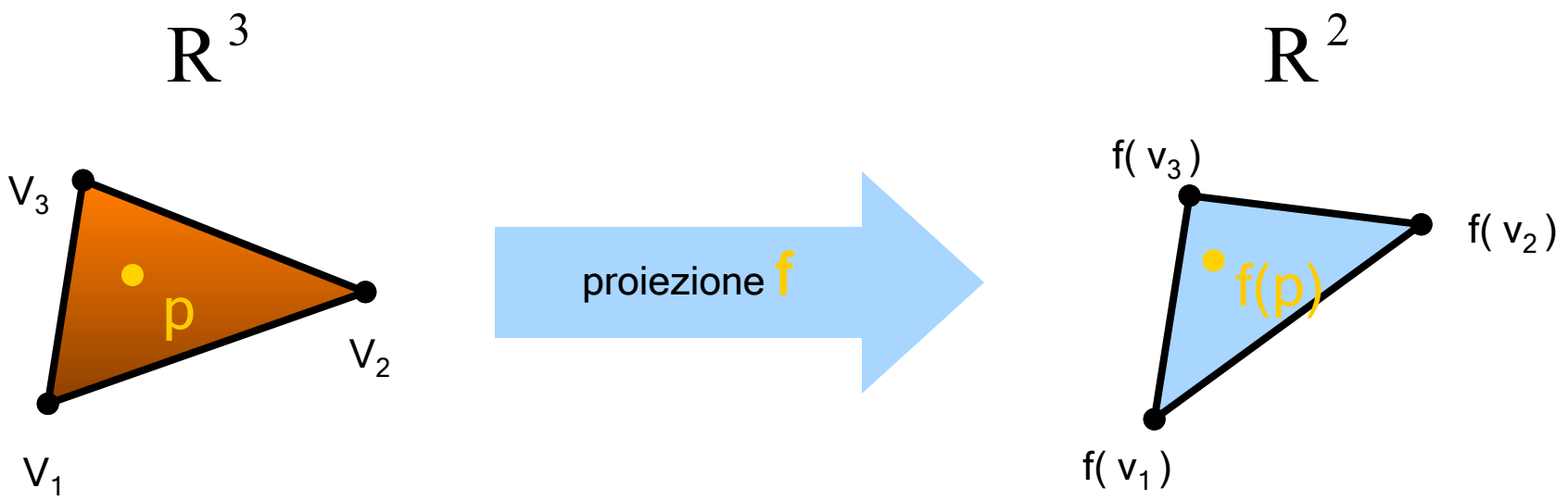
compreso: coordinate texture (per vertice!)

interpolo coordinate texture

coordinate texture interpolate

Texture RAM

Interpolazione delle coordinate texture



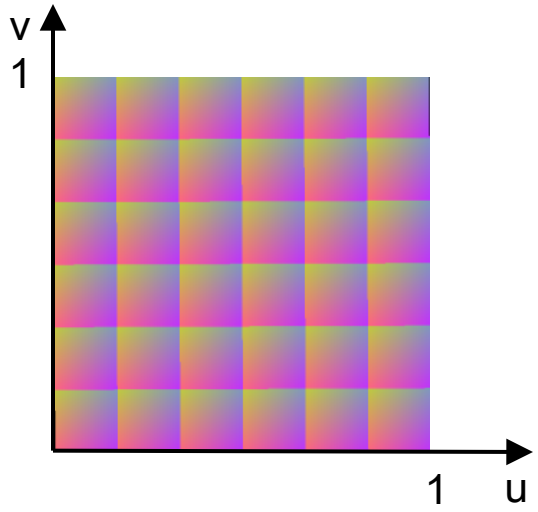
p ha coordinate baricentriche a,b,c nel triangolo v_1 v_2 v_3

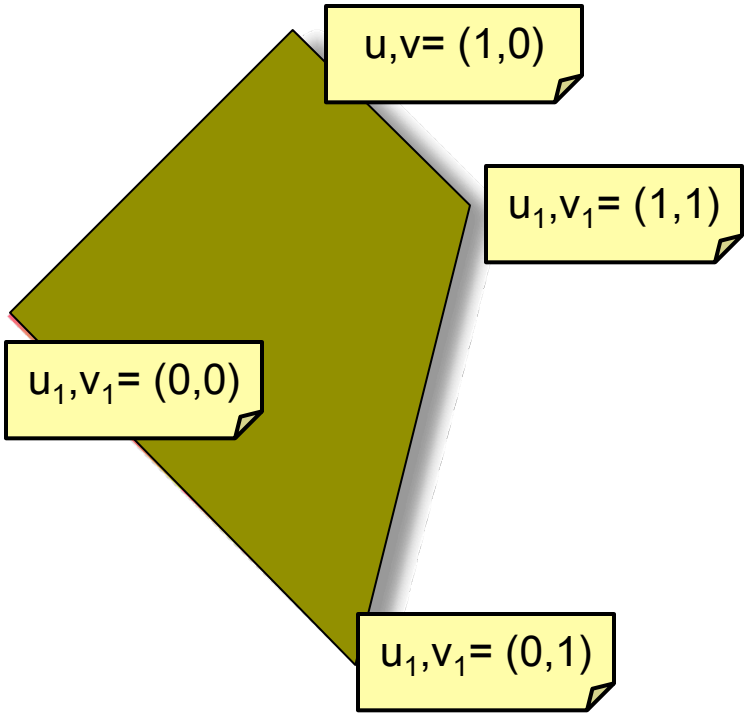
f(p) ha coordinate baricentriche a,b,c nel triangolo $f(v_1)$ $f(v_2)$ $f(v_3)$

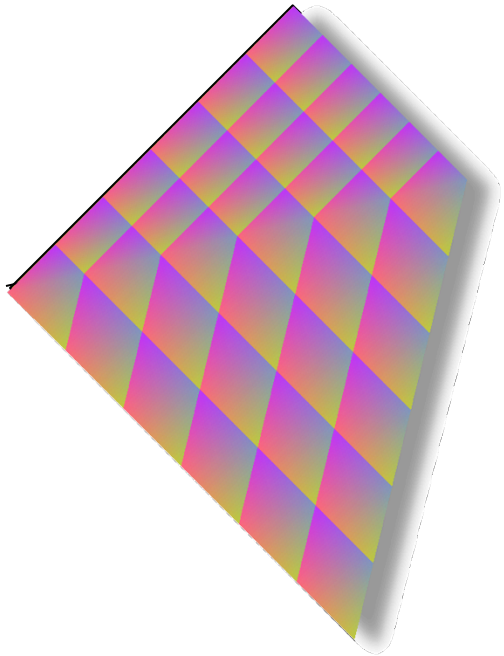
- Non vale per la proiezione prospettica poiché è solo una approssimazione che è utile per colori e normali ma non funziona quando interpoliamo coordinate texture...

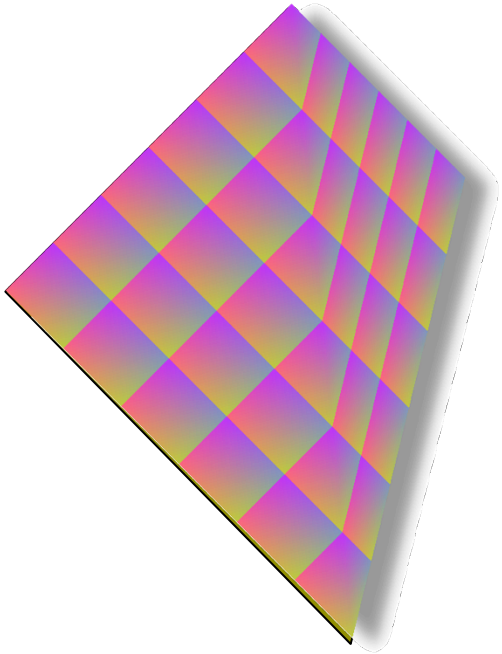
Interpolazione delle coordinate texture

- Esempio:





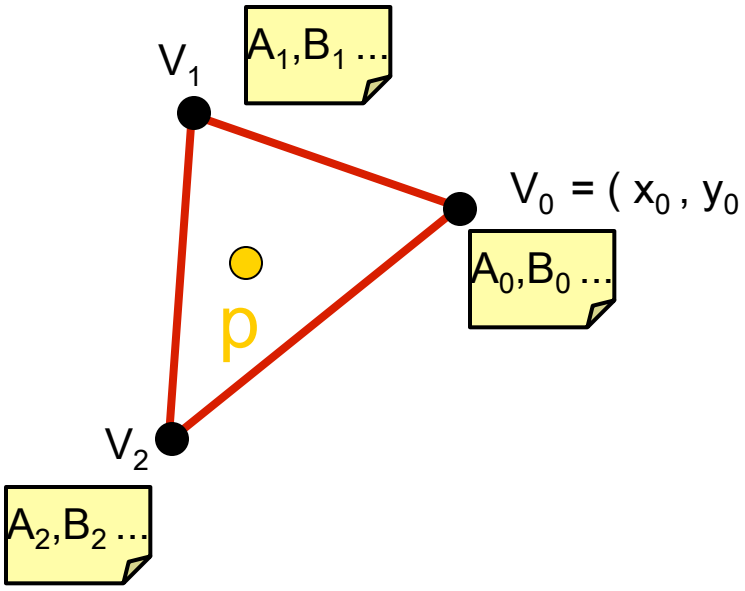




Correzione Prospettica

- p ha coordinate baricentriche $c_0\ c_1\ c_2$

$$p = c_0 v_0 + c_1 v_1 + c_2 v_2$$



attributi di p:
(senza considerare
la correzione prospettica)

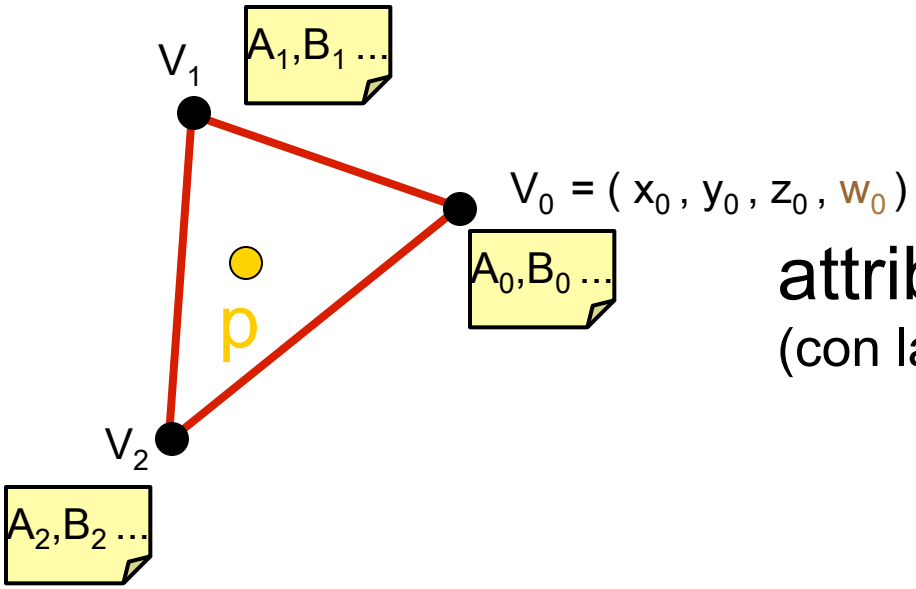
$$A_p = c_0 A_0 + c_1 A_1 + c_2 A_2$$

$$B_p = c_0 B_0 + c_1 B_1 + c_2 B_2$$

Correzione Prospettica

- p ha coordinate baricentriche $c_0\ c_1\ c_2$

$$p = c_0 v_0 + c_1 v_1 + c_2 v_2$$

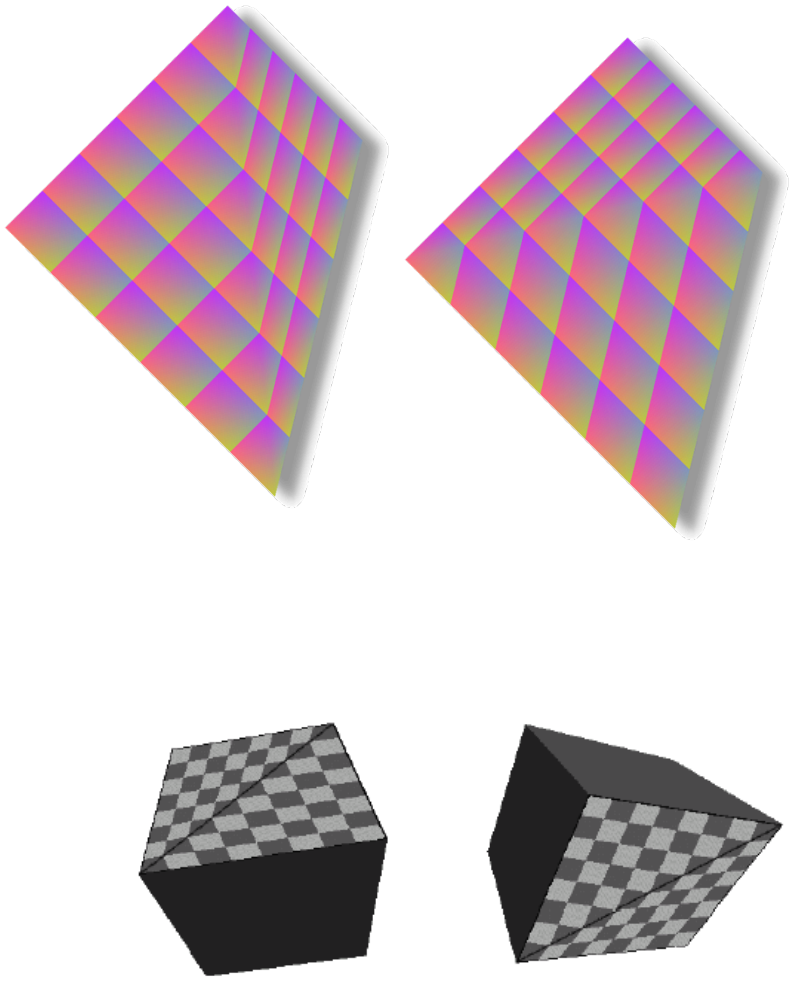


attributi di p:
(con la correzione prospettica)

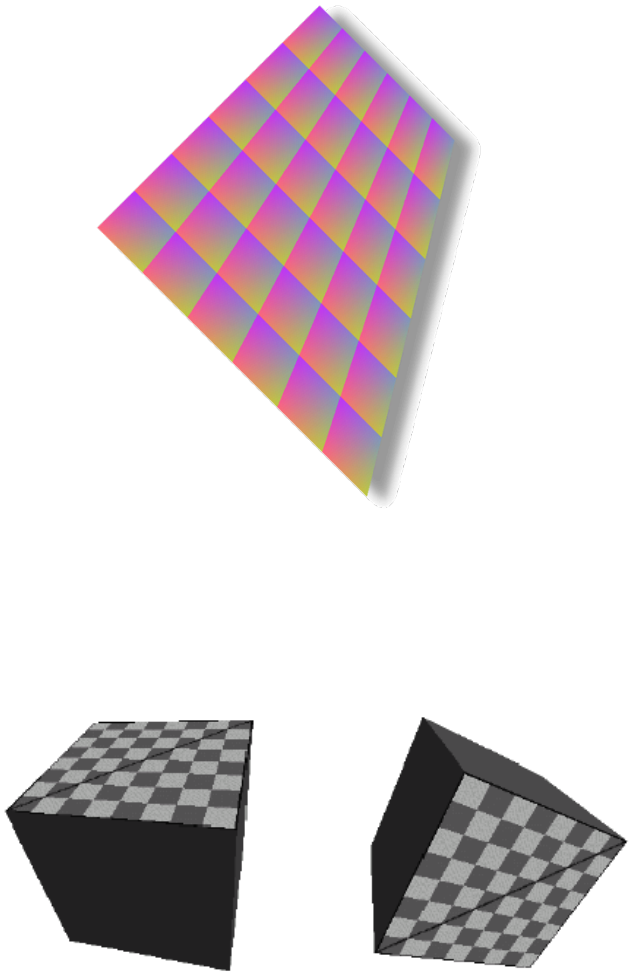
$$A_p = \frac{c_0 \frac{A_0}{w_0} + c_1 \frac{A_1}{w_1} + c_2 \frac{A_2}{w_2}}{c_0 \frac{1}{w_0} + c_1 \frac{1}{w_1} + c_2 \frac{1}{w_2}}$$

Correzione Prospettica

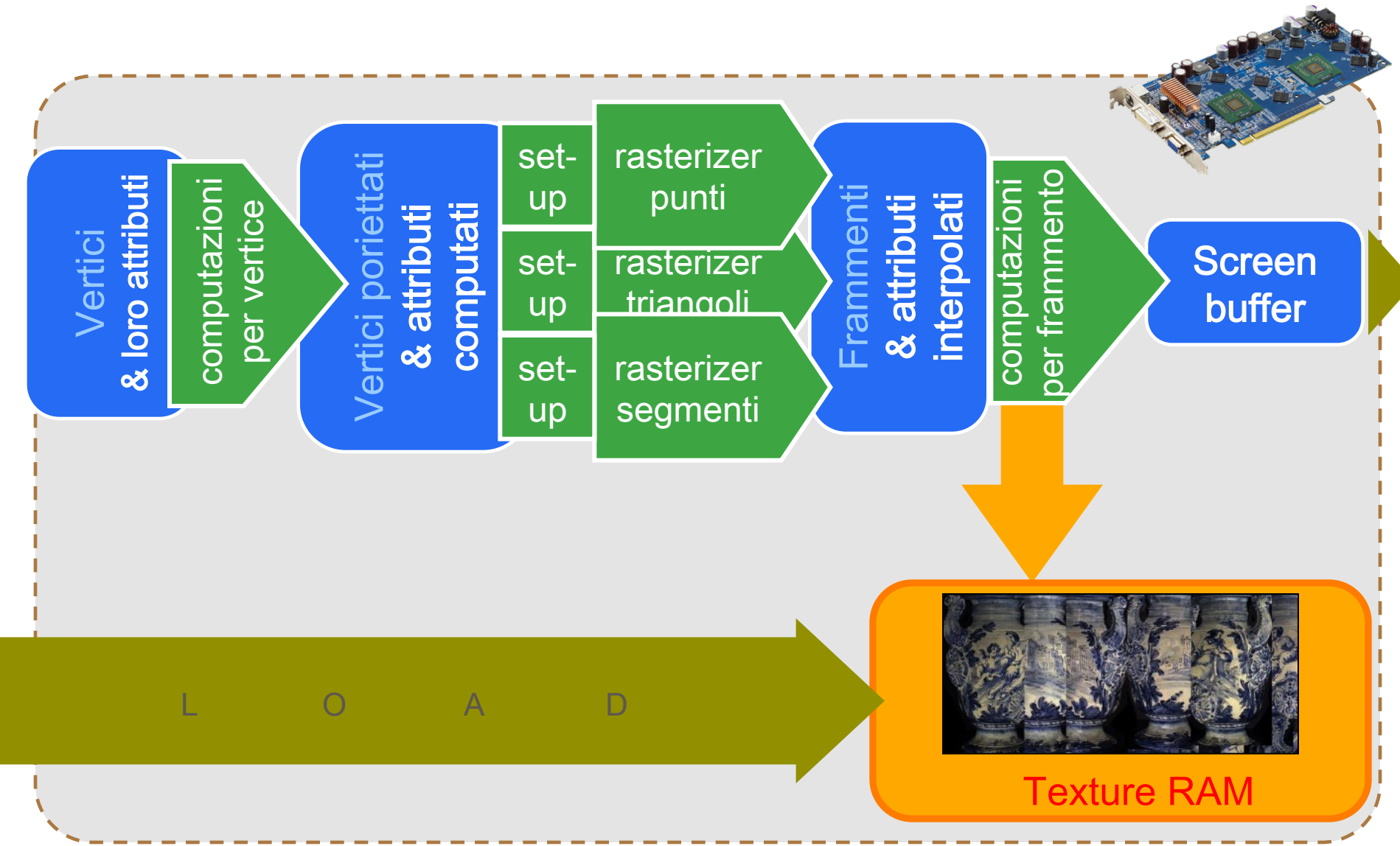
- Senza



- Con



Nota: la tessitura va caricata



Nota: la tessitura va caricata

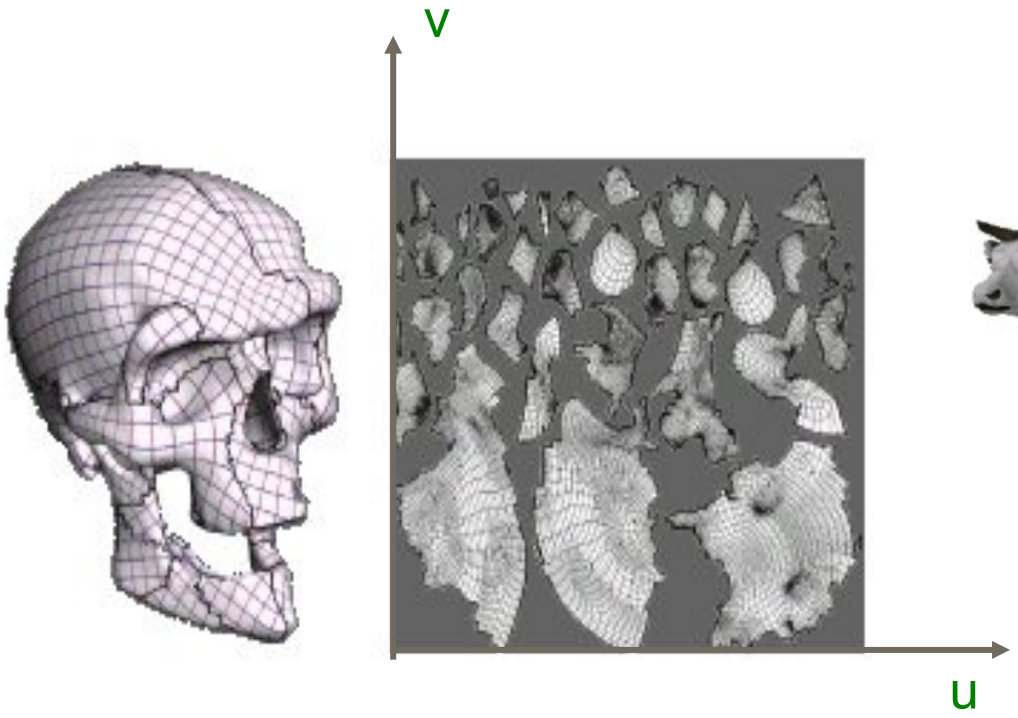
- Da disco a memoria RAM main (sulla scheda madre)
- Da memoria RAM main a Texture RAM (on board dell'HW grafico)
- Entrambe le operazioni sono piuttosto lente e sono impossibili da fare una volta per frame quindi nel progetto dell'applicazione si devono utilizzare strategie per la gestione delle texture

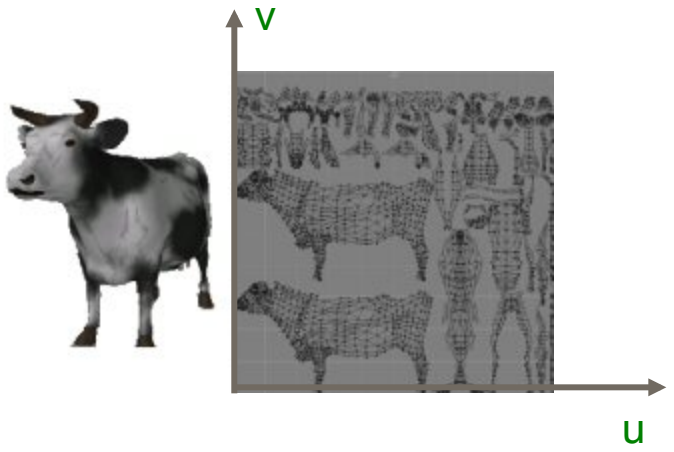
Assegnazione delle coordinate texture

- Due classi di soluzioni:
  - Calcolare le coordinate textures on-the-fly durante il rendering…
  - Precomputarle (e salvarle insieme alla mesh)
- Non esiste una soluzione ideale, dipende dall'applicazione che stiamo progettando
- Modelli con una sola texture l'avranno precomputata, per altri che variano dinamicamente l'assegneremo in rendering

Problema difficile: u-v mapping

- Assegnare una coppia di coordinate textures ad ogni vertice della mesh in preprocessing

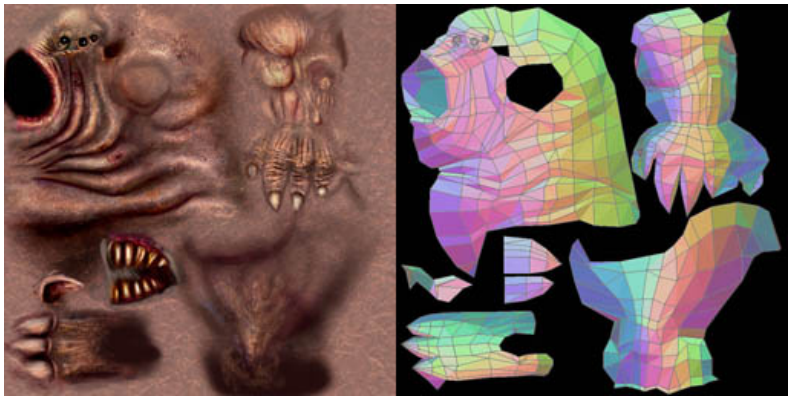




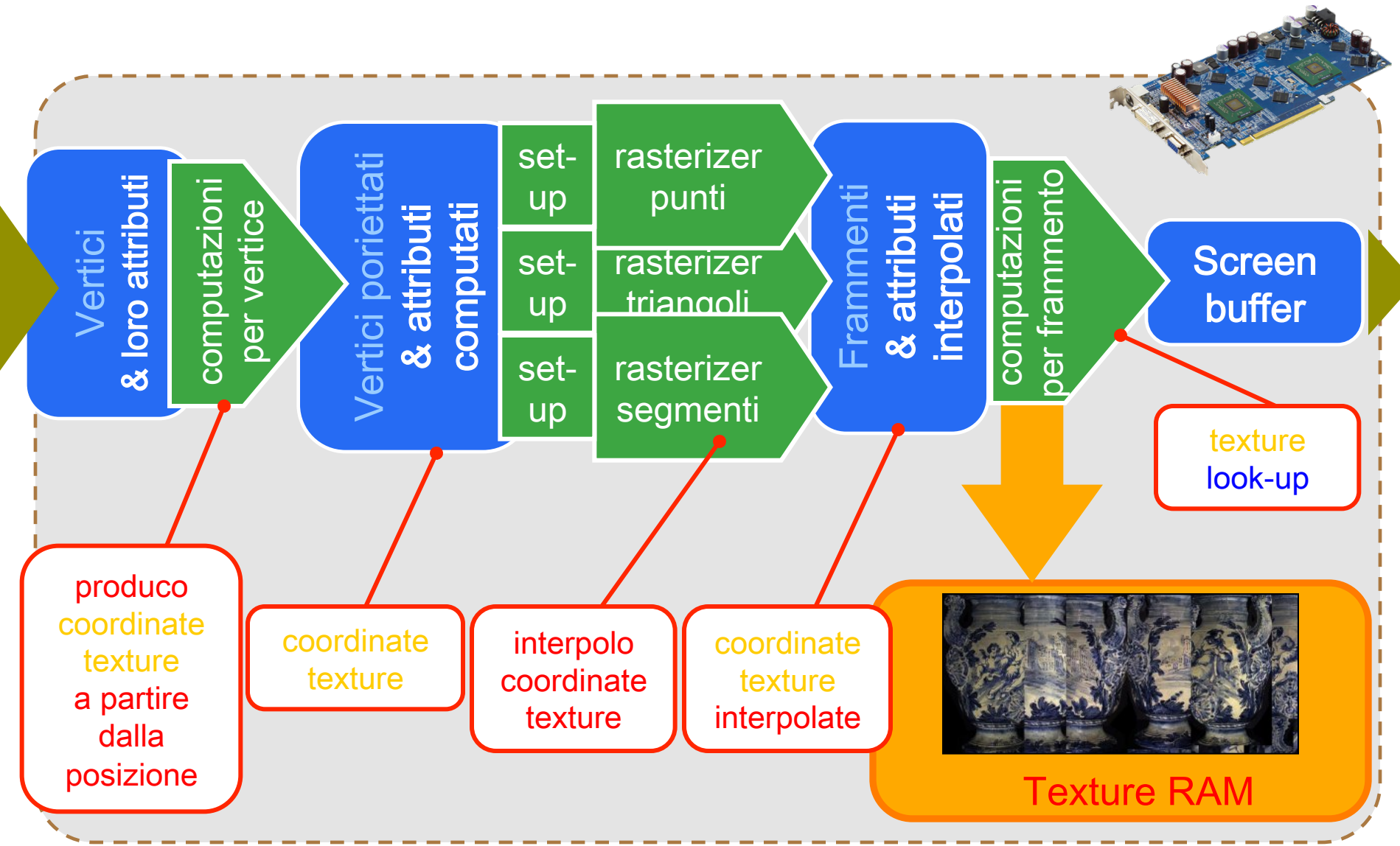
Texture atlas

Problema difficile: u-v mapping

fatto a mano,
o automatizzato

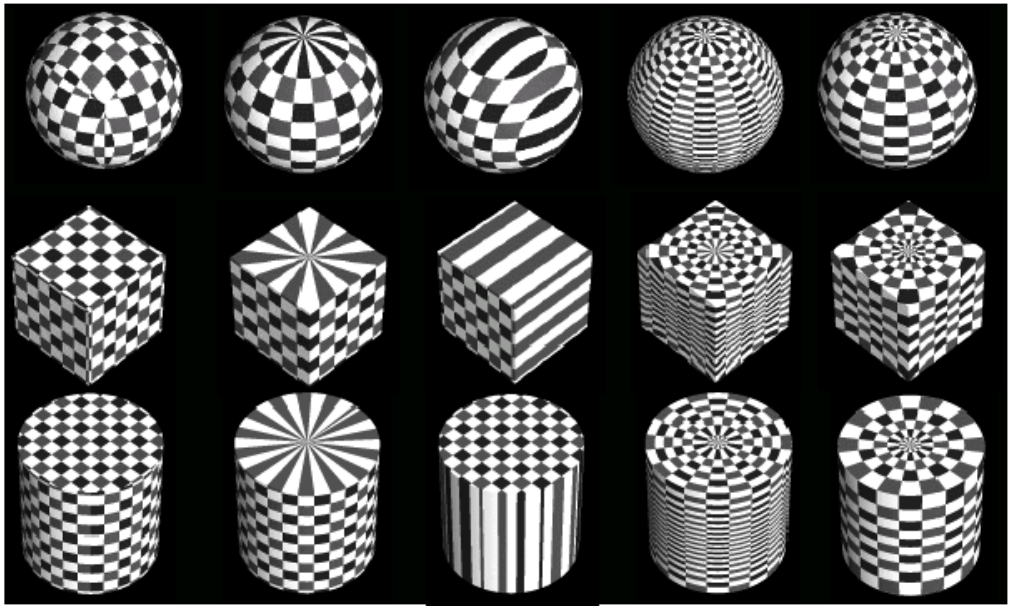


Come si assegnano le coordinate texture ai vertici?



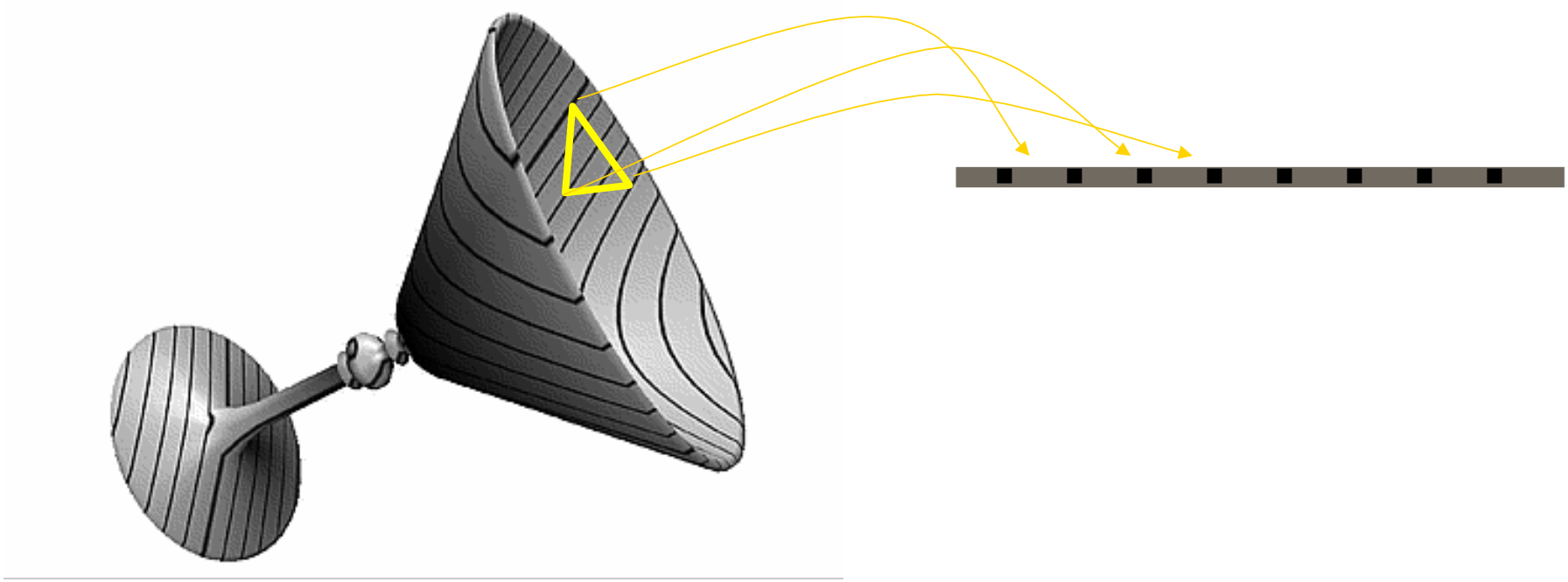
Create automaticamente

- Si utilizza un mapping lineare da (x,y,z) a (u,v) in coordinate oggetto o vista (prima o dopo la trasformazione)
- Esempi:



Create automaticamente

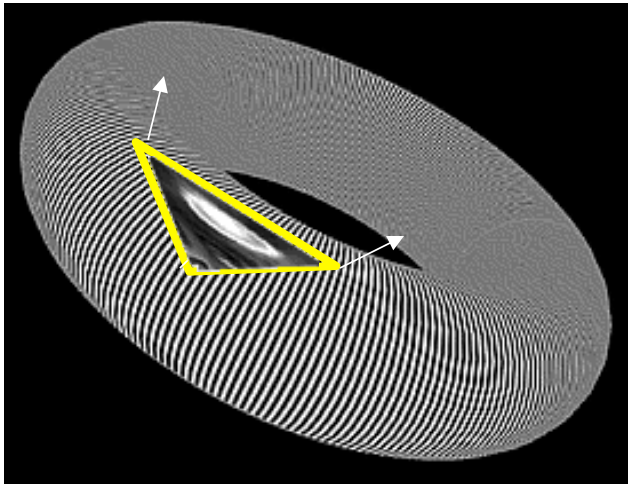
- La texture può anche essere una semplice immagine 1D



Environment mapping: sferico

Environment map: una tessitura
che memorizza il colore dell'ambiente "riflesso"
da ogni normale della semisfera.

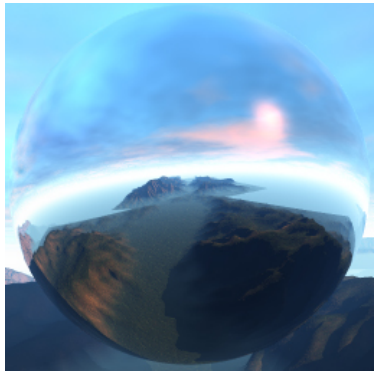
Come coordinata tessitura, basta usare
la normale trasformata!

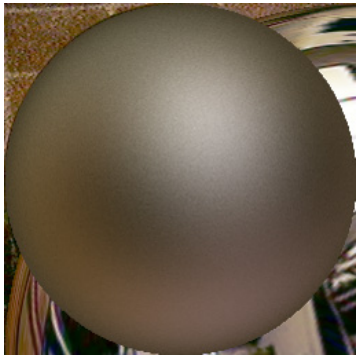
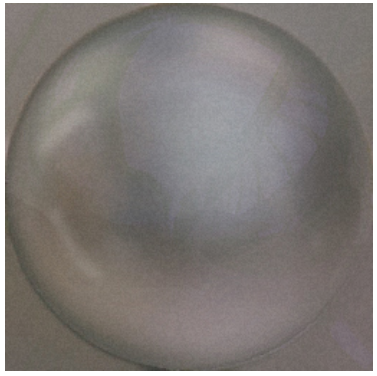


Environment mapping: sferico

simula oggetto a specchio che riflette uno sfondo lontano

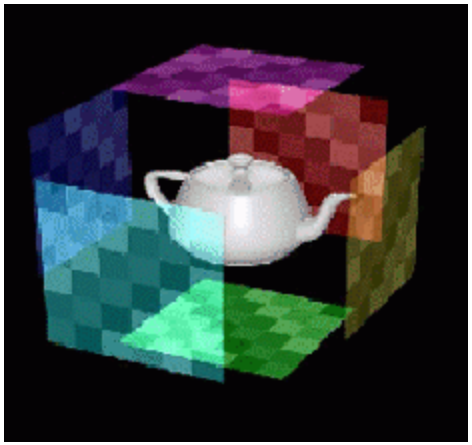


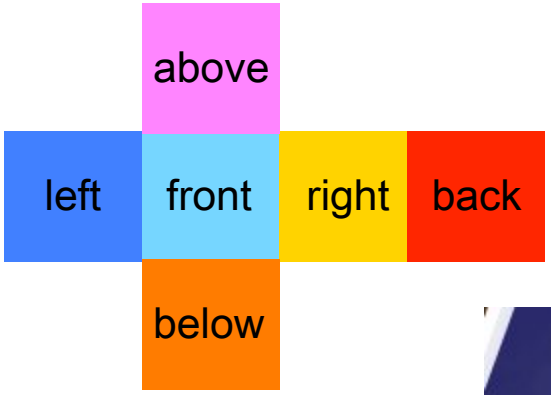



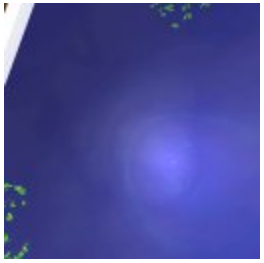



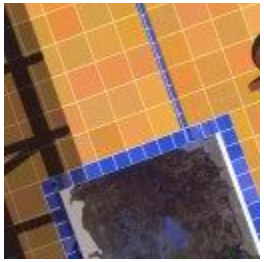
simula un materiale complesso
(condizioni di luce fisse)

Environment mapping: cubico

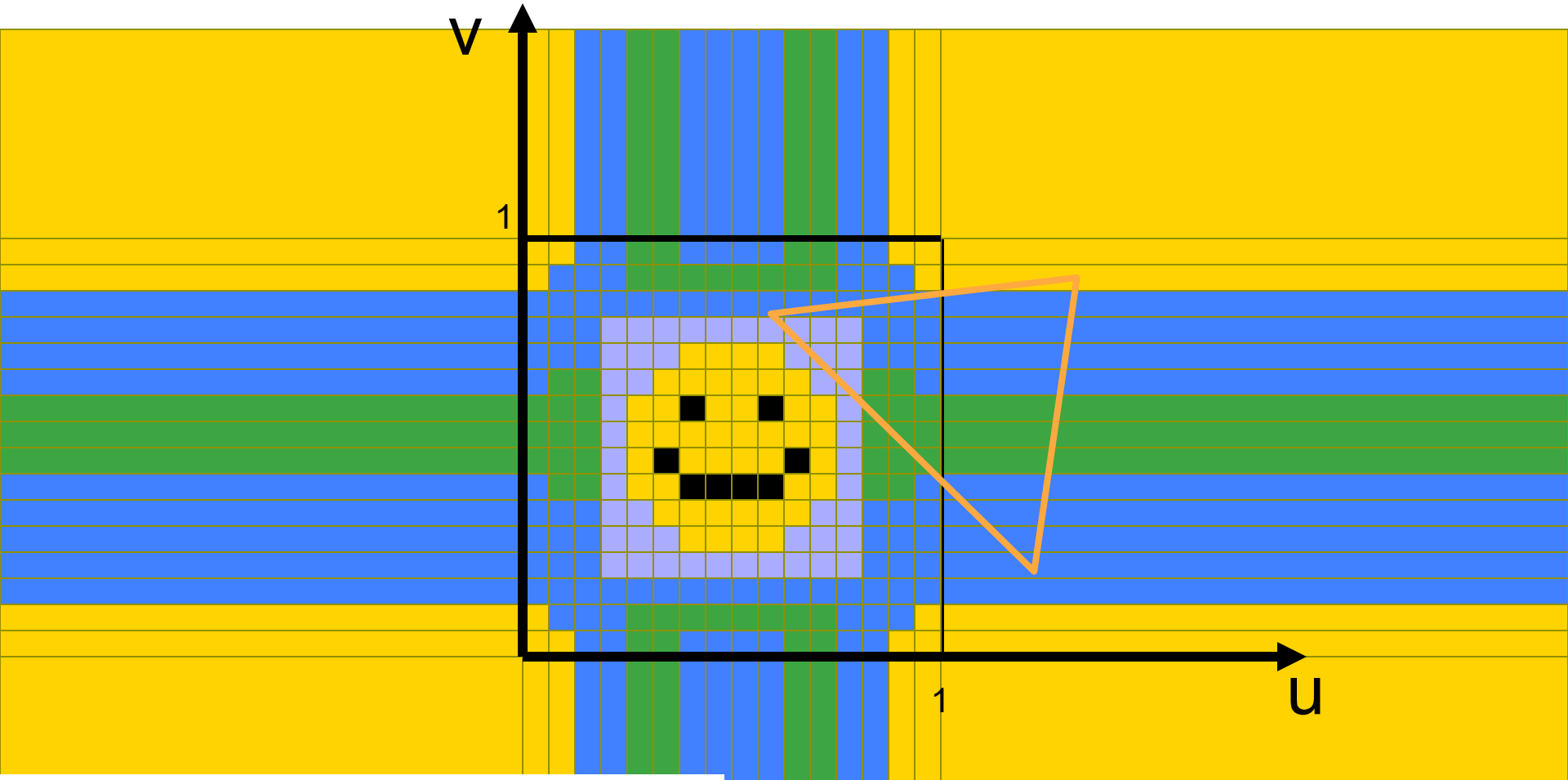






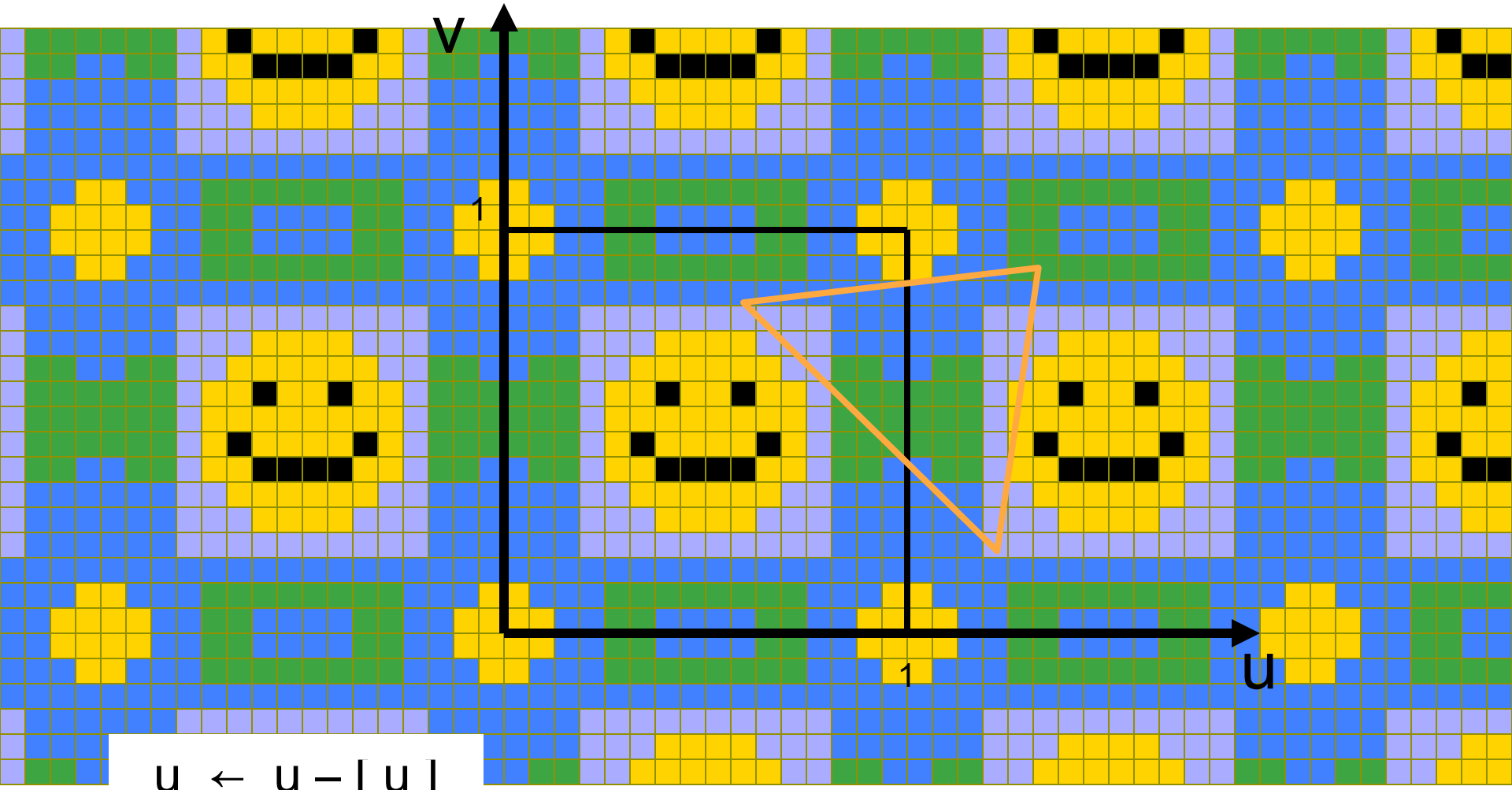


Texture fuori dai bordi: modo *clamp*



if (u<0) u←0; if (u>1) u←1;
if (v<0) v←0; if (v>1) v←1;

Texture fuori dai bordi: modo *repeat*



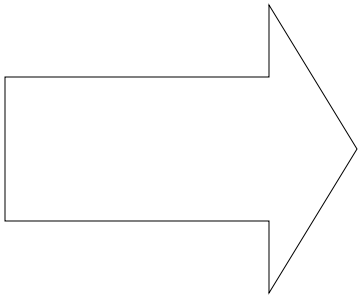
$u \leftarrow u - [u]$

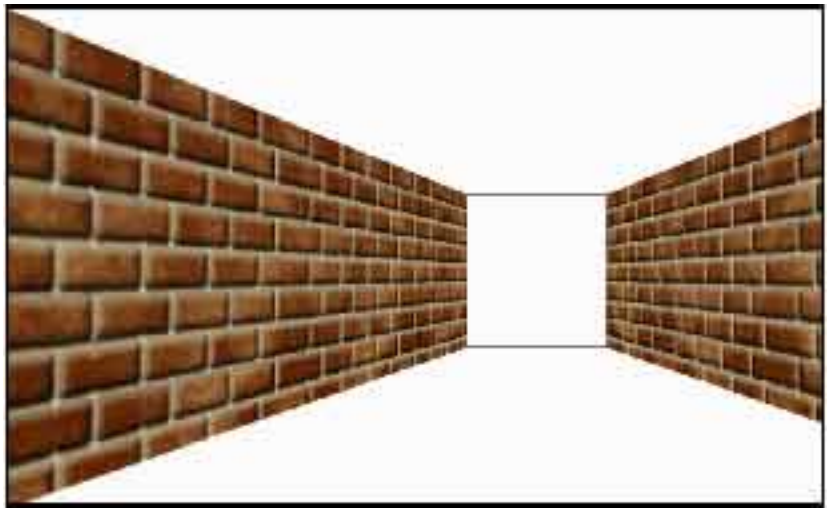
$v \leftarrow v - [v]$

Tessiture ripetute

- Tipico utilizzo:

Nota: deve essere TILABLE





Molto efficiente in spazio: una sola texture mappa su molti triangoli

Texture Mapping

Vertici & loro attributi

computazioni per vertice

Vertici proiettati & attributi computati

set-up

set-up

set-up

rasterizer punti

rasterizer triangoli

rasterizer segmenti

Frammenti & attributi interpolati

computazioni per frammento

Screen buffer

texture look-up

compreso: coordinate texture (per vertice!)

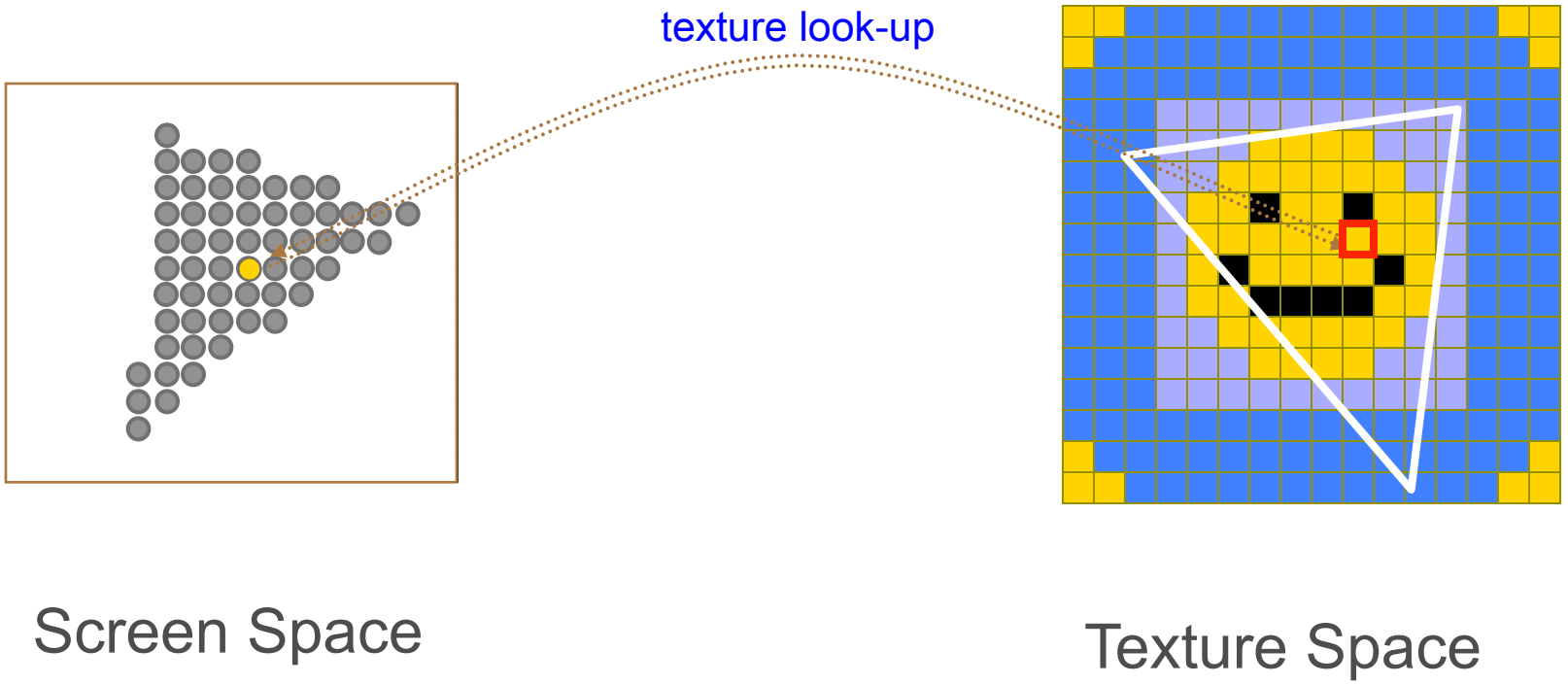
interpolo coordinate texture

coordinate texture interpolate

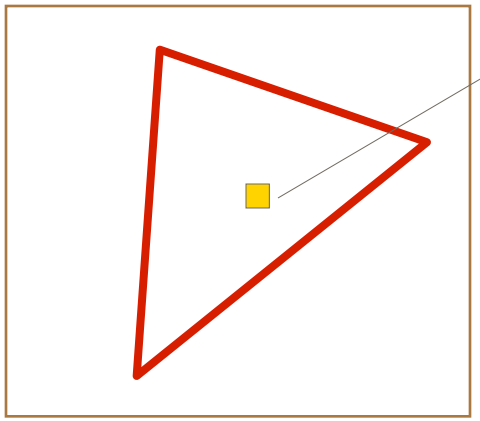
Texture RAM

Texture Look-up

- Un frammento ha coordinate non intere (in texels)

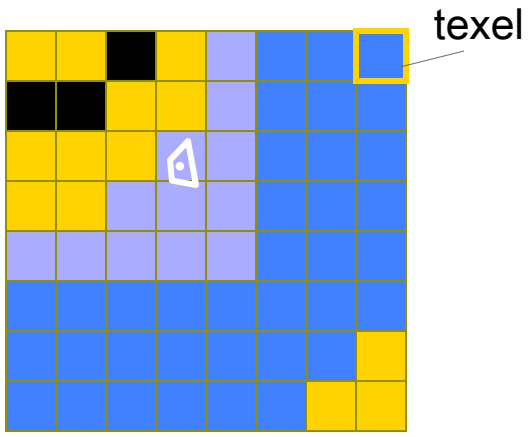


Texture Look-up



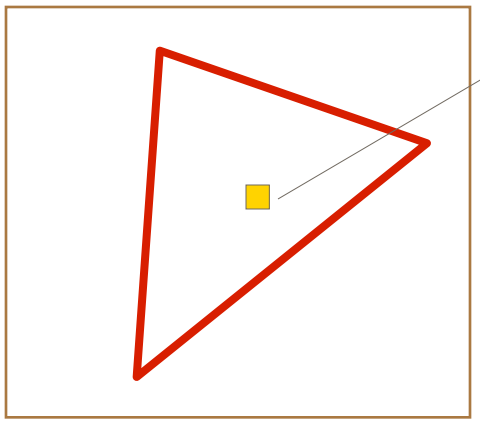
un pixel = meno di un texel

magnification



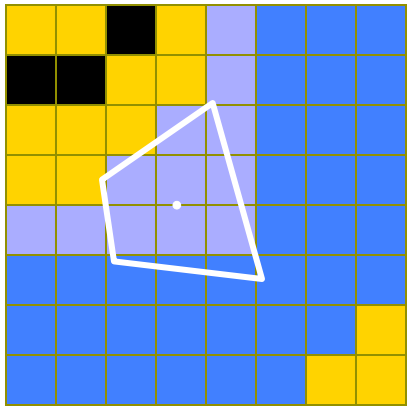
Screen Space

Texture Space



un pixel = più di un texel

minification



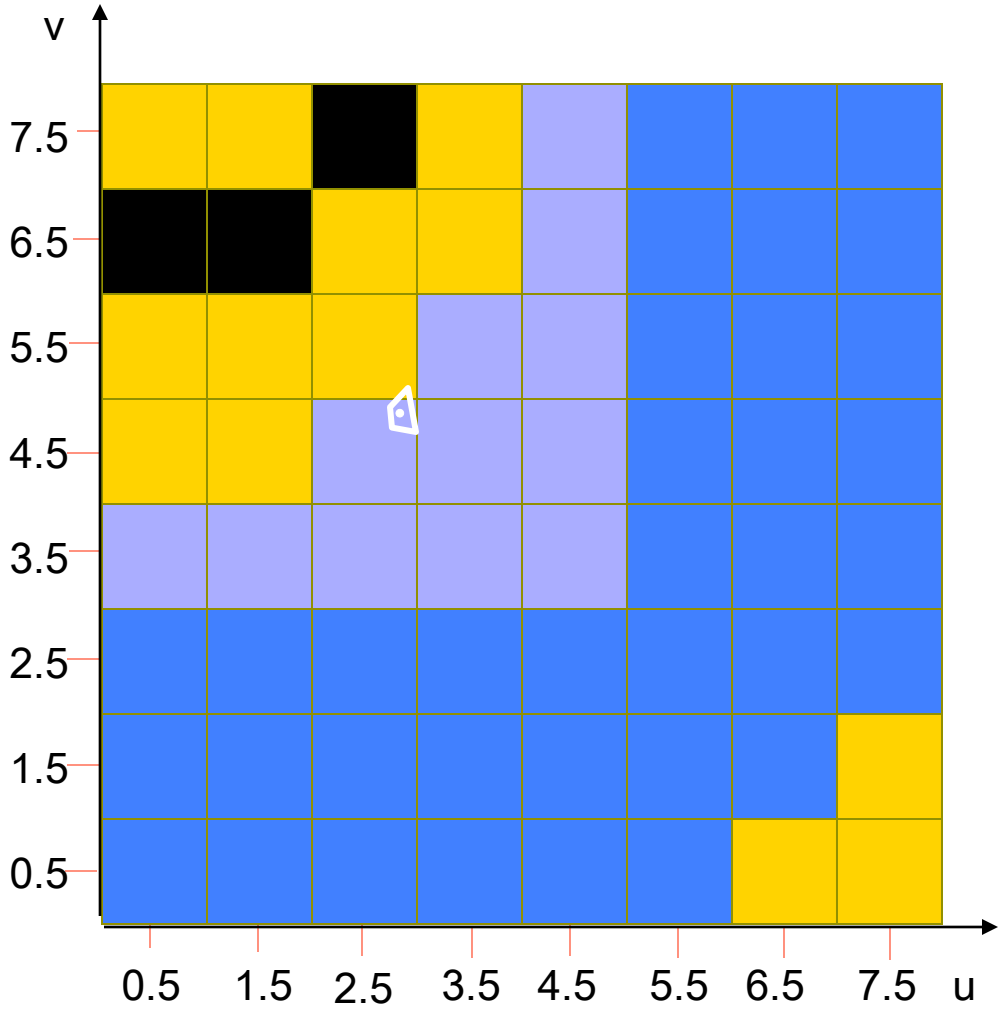
Caso Magnification

Soluzione 1:
prendo il texel in cui sono

(equivale a prendere
il texel più vicino)

equivale ad arrotondare
alle coordinate texel
intere

"Nearest Filtering"



Caso Magnification

Nearest Filtering: risultato visivo

texture 128x128

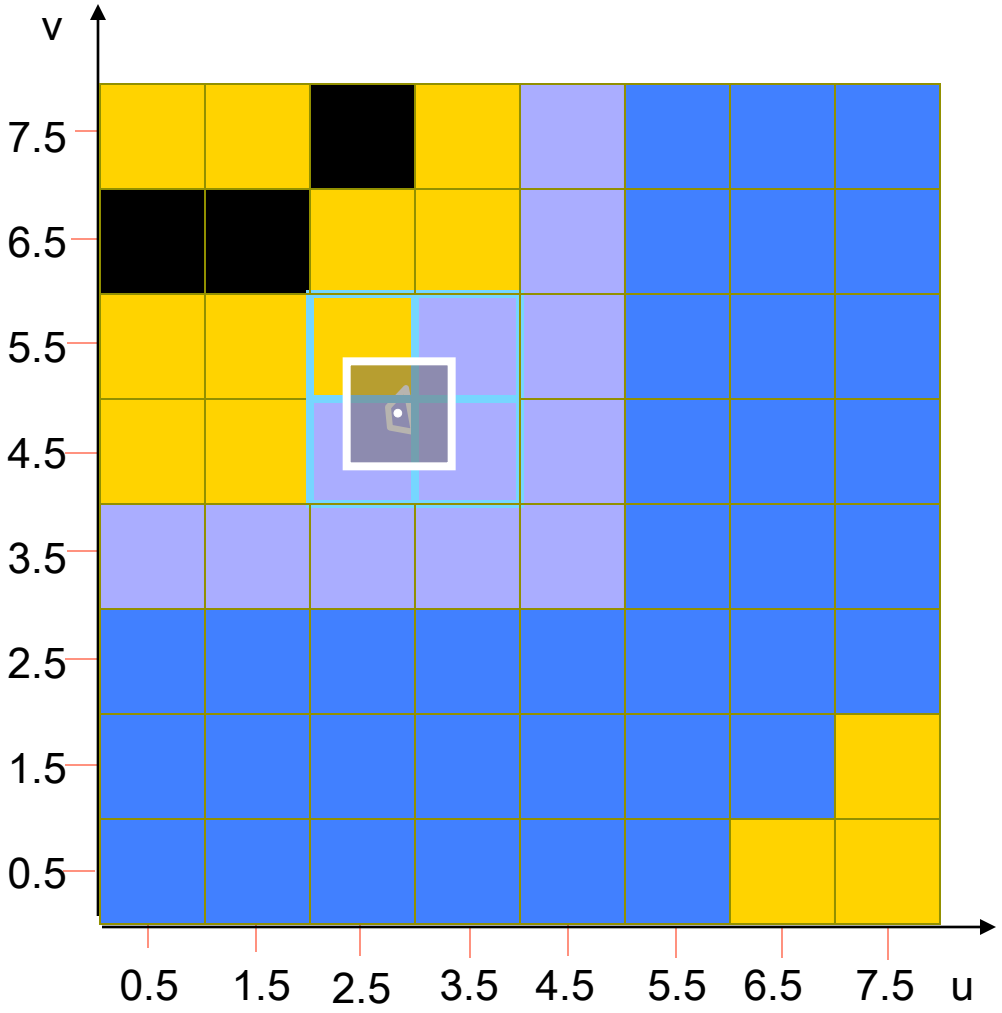
"si vedono i texel !"

Caso Magnification

Soluzione 2:

Medio il valore dei quattro texel più vicini

Interpolazione Bilineare



Caso Magnification

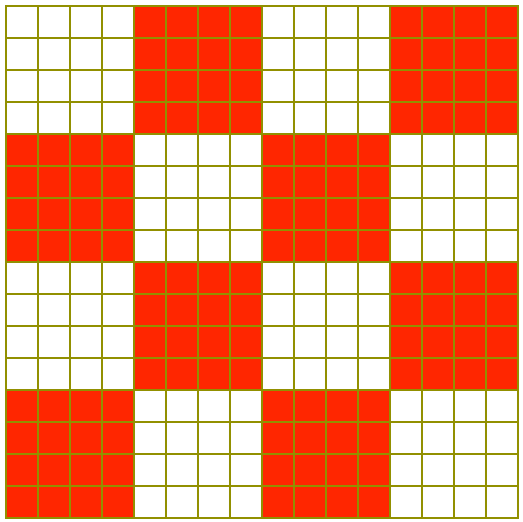
Bilinear Interpolation: risultato visivo

texture 128x128

Caso Magnification

- Modo Nearest:
  - si vedono i texel
  - va bene se i bordi fra i texel sono utili
  - più veloce
- Modo Interpolazione Bilineare
  - di solito qualità migliore
  - può essere più lento
  - rischia di avere un effetto "sfuocato"

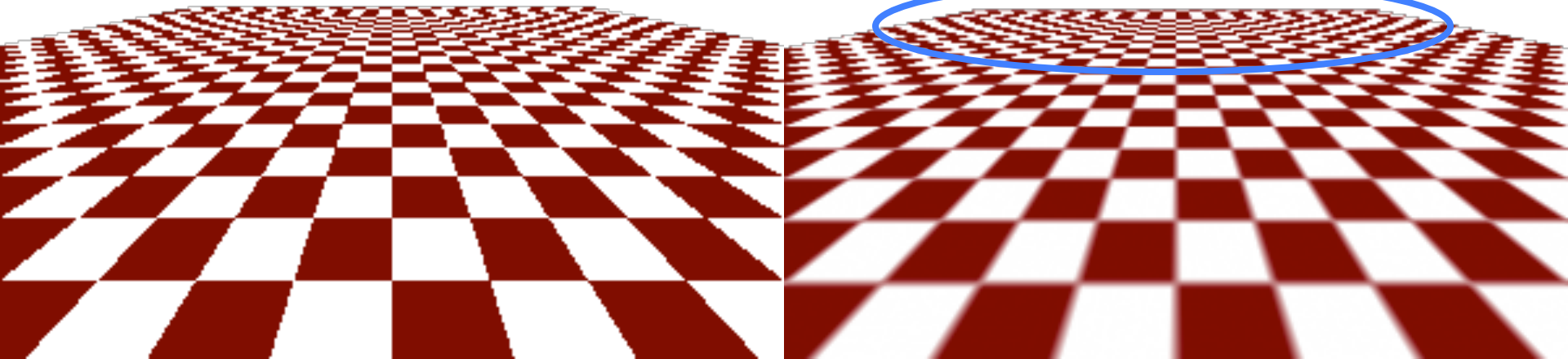
Caso Minification



Nearest Filtering

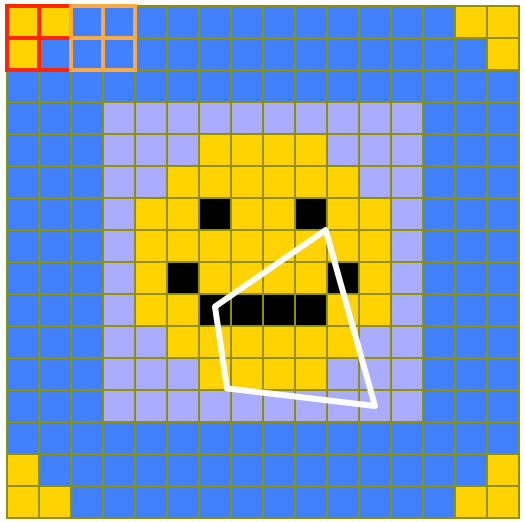
Bilinear interpolation

non risolve il problema

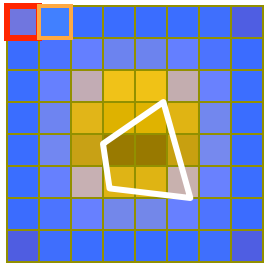


Caso Minification: MIP-mapping

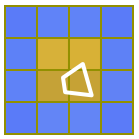
MIP-mapping: "Multum In Parvo"



MIP-map
level 0



MIP-map
level 1



MIP-map
level 2

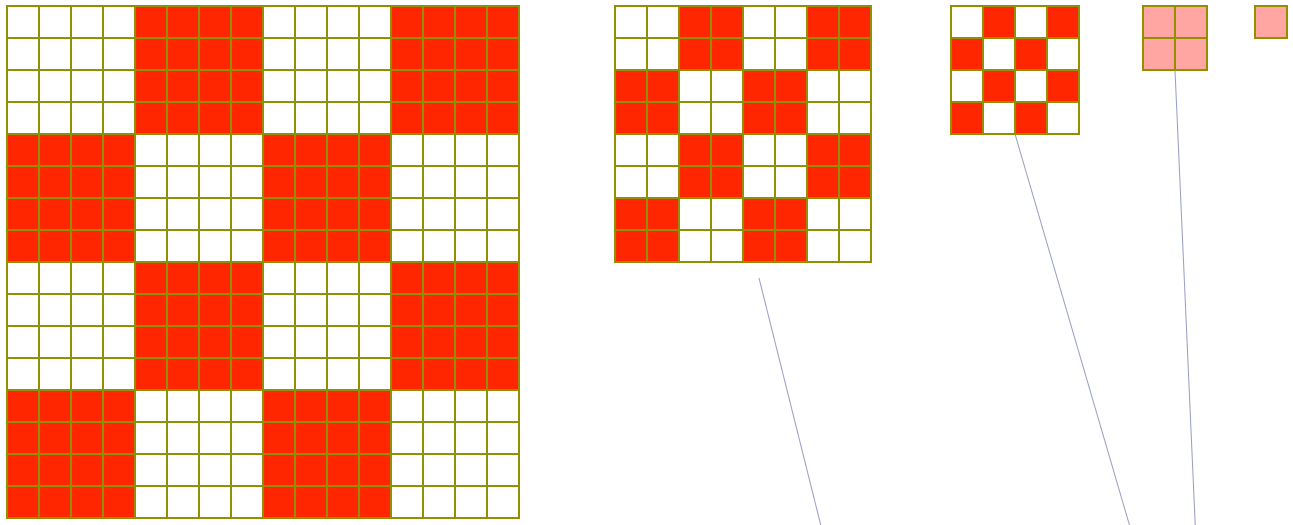
MIP-map
level 3

MIP-map
level 4
(un solo texel)

Mipmap Math

- Definiamo un fattore di scala, ρ=texels/pixel come valore massimo fra ρ_x e ρ_y, che può variare sullo stesso triangolo, può essere derivato dalle matrici di trasformazione ed è calcolato nei vertici, interpolato nei frammenti
- Il livello di mipmap da utilizzare è: $\log_2 \rho$ dove il livello 0 indica la massima risoluzione
- Il livello non è necessariamente un numero intero e può quindi essere arrotondato

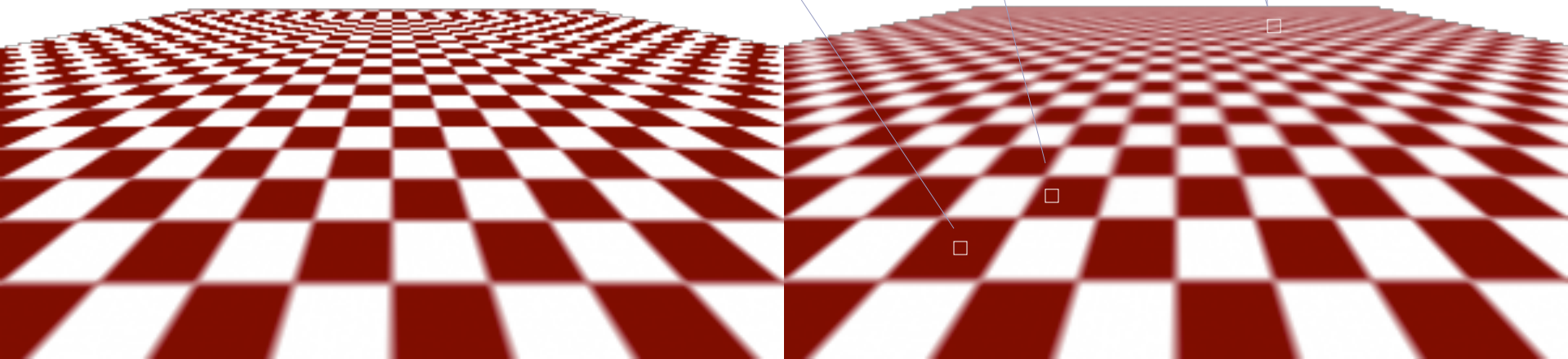
Caso Minification: MIP-mapping



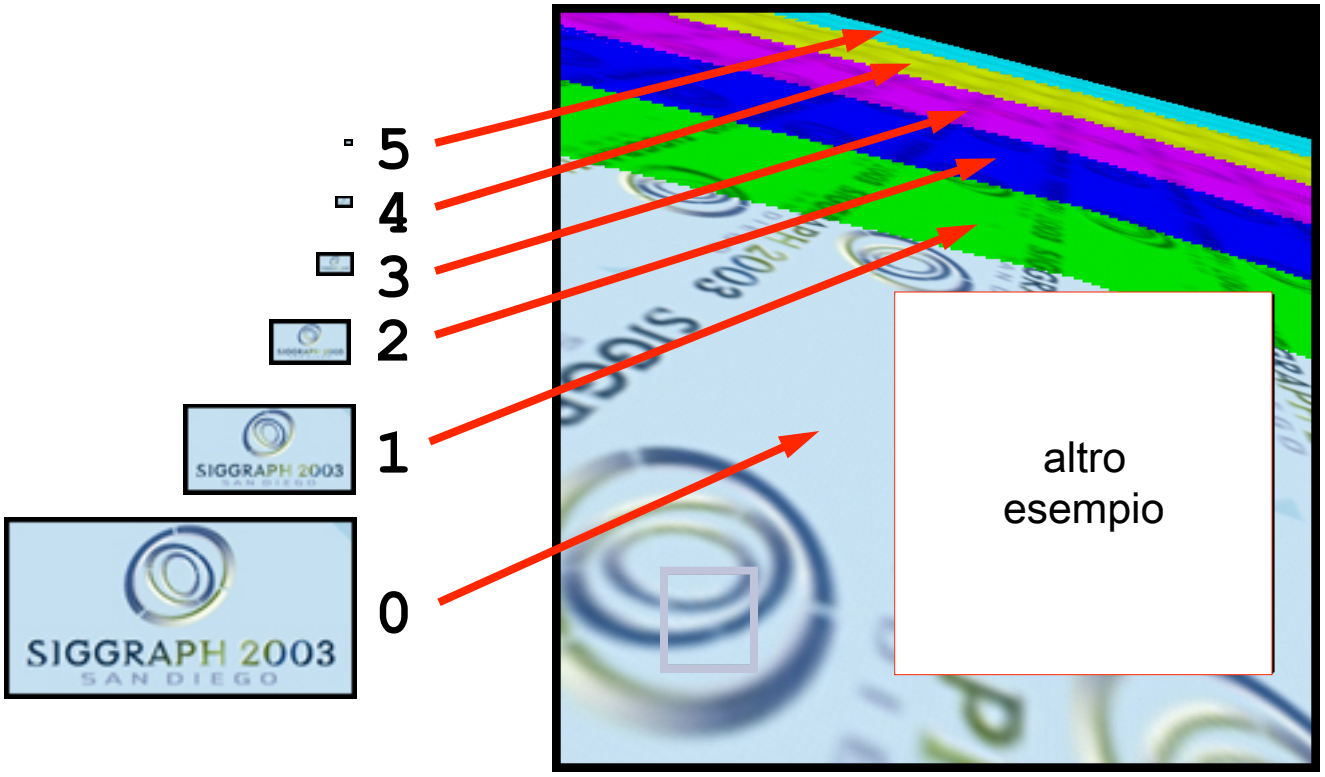
Bilinear interpolation

non risolve il problema

MIP-mapping

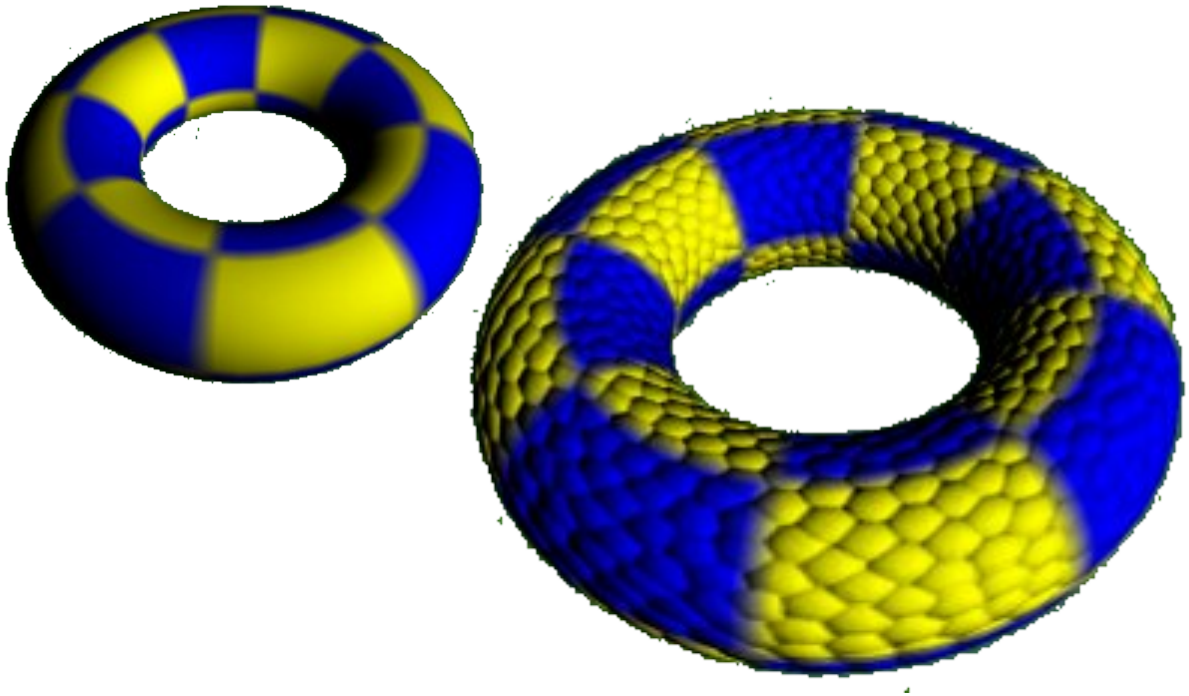


Caso Minification: MIP-mapping



Bump mapping

- Un ulteriore modifica all'apparenza del rendering può essere effettuata usando il bump mapping



Bump mapping

- Il metodo prevede di variare la normale alla superficie pixel per pixel utilizzando la formula:

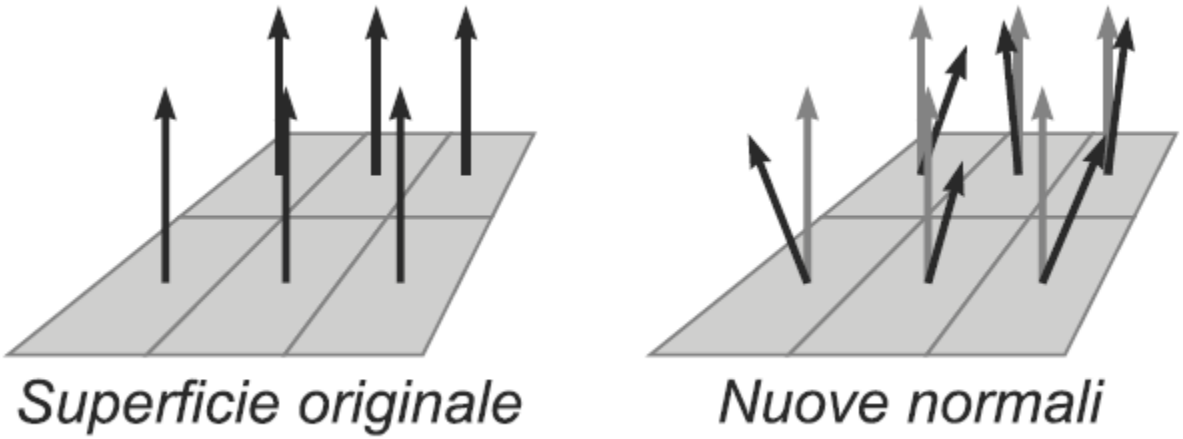
$$\vec{\mathbf{N}}_{new} = \vec{\mathbf{N}}_{old} + \vec{\mathbf{D}};$$

$$\vec{\mathbf{D}} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$$

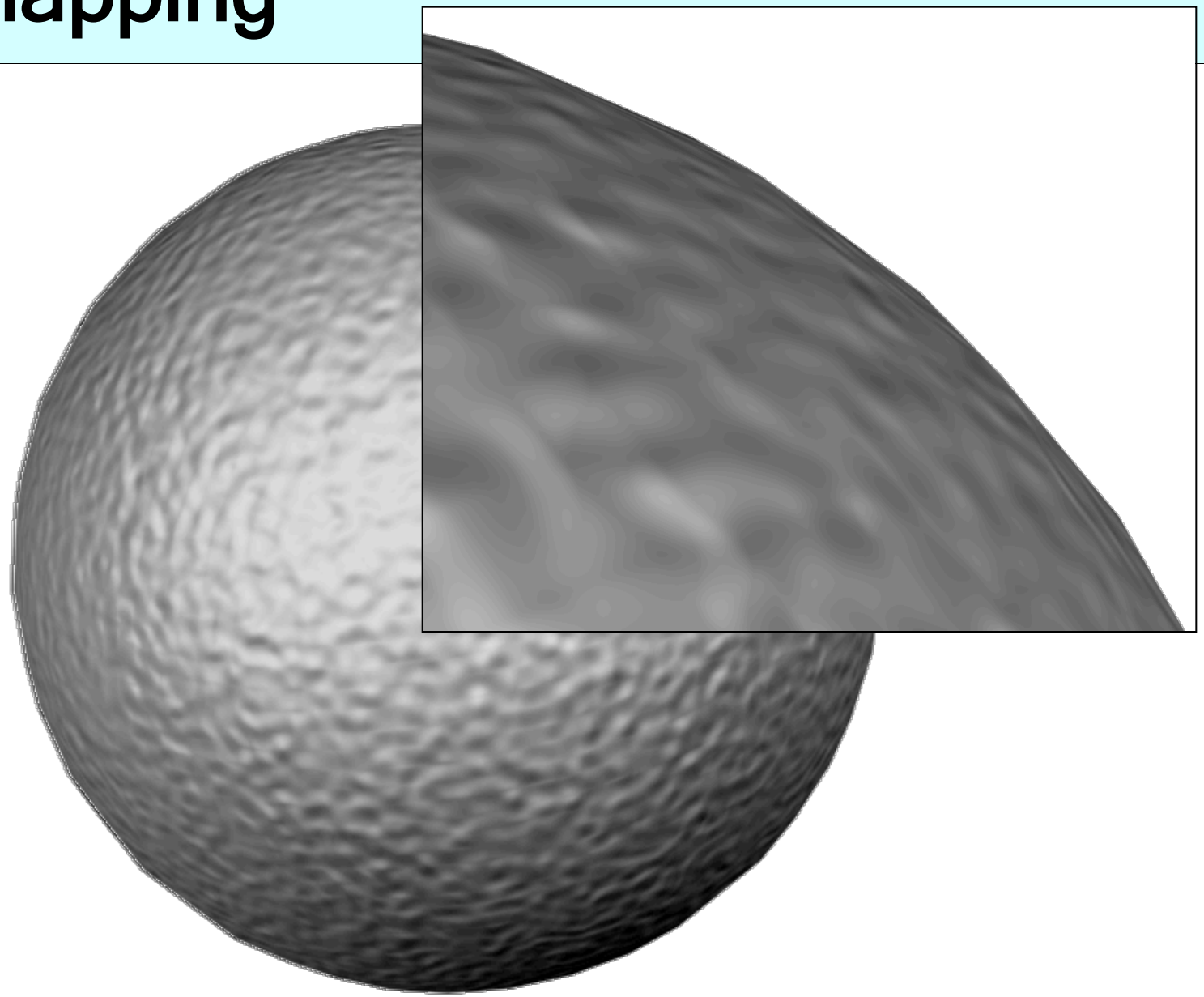
- I texel in questo caso sono utilizzati ad uno stadio diverso rispetto ai color texel, prima del calcolo dell'equazione di illuminazione

Bump mapping

- L'effetto che si ottiene è un perturbazione del valore delle normali che altera il rendering senza modificare la geometria



Bump mapping



Displacement mapping

- Nel displacement mapping si modifica effettivamente la geometria dell'oggetto spostando i punti della superficie:

$$P_{new} = P_{old} + h \cdot \vec{\mathbf{N}}$$

- Il displacement mapping è eseguito in fase di rendering e non modifica stabilmente la geometria della scena
- Rispetto al bump mapping anche la silhouette del modello mostra le corrette deformazioni

Displacement mapping