

# Algoritmi per la visualizzazione

Prof.ssa Tiziana Calamoneri  
VISUALIZZAZIONE DI  
SUPERFICI TRIDIMENSIONALI

## Il problema della triangolazione

### Il problema della triangolazione (1)

- Se vogliamo rappresentare una curva o una retta in uno spazio 2D, a causa del fatto che ogni supporto grafico è discretizzato, dobbiamo avvalerci di una sua approssimazione tramite segmenti orizzontali o verticali.
- Allo stesso modo, nello spazio 3D, per rappresentare una superficie, dobbiamo necessariamente usare una sua approssimazione discretizzata, cioè una forma poliedrica.
- La forma di rappresentazione più semplice che si adotta per descrivere modelli geometrici solidi è quella dei poliedri con facce triangolari.

### Il problema della triangolazione (2)

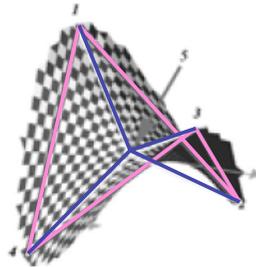
#### PERCHE' I TRIANGOLI?

- vantaggio fondamentale dal punto di vista geometrico: per 3 punti passa uno ed un solo piano  $\Rightarrow$  una faccia triangolare è univocamente definita dai suoi tre vertici.
- si evitano verifiche sulla complanarità dei vertici di ogni faccia, infatti 3 punti sono sempre complanari, ma 4 o più punti che vogliamo definiscano una faccia non è detto che giacciono sullo stesso piano e definiscano, quindi, una faccia ammissibile.
- ...

## Il problema della triangolazione (3)

PERCHE' I TRIANGOLI? (segue)

- specie se la superficie non è estremamente regolare usando facce quadrangolari non si riesce sempre ad approssimarla bene, mentre l'approssimazione ottenuta tramite facce triangolari è migliore.



## Il problema della triangolazione (4)

- PROBLEMA: data una superficie, determinarne una sua triangolazione.
- MA: qual è il numero giusto di triangoli?
  - aumentando il numero di triangoli si ottiene una maggiore *accuratezza*
  - diminuendo il numero di triangoli si ottiene una maggiore *efficienza*, sia nella memorizzazione che nella gestione.
- Occorre quindi trovare un equilibrio tra accuratezza ed efficienza.
- Il procedimento per scomporre in triangoli una superficie si chiama *tassellazione* o *triangolazione*, ed è di questo che ci occuperemo nel seguito.

## Calcolo dei punti della triangolazione (1)

- PRIMO PASSO: calcolare i vertici che definiscono la triangolazione
- SOLUZIONE 1: superficie:  $z=f(x,y)$ , per costruire una triangolazione si possono individuare tutti i punti sulla superficie che abbiano coordinate  $x$  e  $y$  tra loro a distanza costante in tutte le direzioni. Per ottenere questo risultato, è sufficiente decidere la distanza  $d$  e poi individuare tutti i punti  $P_{i,j}=(x_i, y_j, z_{i,j})$  tali che  $y_i=id$  e  $y_j=jd$ .
- OK se la superficie ha un andamento regolare, ovvero se la curvatura è abbastanza uniforme. Ma se la superficie ha regioni a curvatura elevata e regioni a curvatura bassa, allora non ha molto senso suddividere tutta la superficie allo stesso modo: sarebbe più proficuo infittire i triangoli nelle regioni a curvatura alta e diradarli nelle altre.

## Calcolo dei punti della triangolazione (2)

- SOLUZIONE 2: superficie:  $z=f(x,y)$ , determiniamo il grado di curvatura valutando le derivate prima e seconda della superficie in prossimità di un determinato punto (questo per tutti i punti).
  - PROBLEMA: difficoltà numerica di calcolare le derivate (limite del rapporto incrementale), quindi ci limitiamo ad approssimarle, calcolando il rapporto incrementale nelle due direzioni  $x$  ed  $y$ :  $\Delta f/\Delta x$  e  $\Delta f/\Delta y$ .
- Se il rapporto incrementale è variato più di una certa soglia nel passare da un punto ad un altro  $\Rightarrow$  curvatura alta  $\Rightarrow$  introduciamo un nuovo punto sulla superficie per costruire un triangolo più piccolo; altrimenti la triangolazione può essere lasciata invariata.
- Laddove la curvatura è praticamente inesistente, potremmo eliminare alcuni punti, senza perdere informazioni. Questa eliminazione prende il nome di *decimazione*.

## Calcolo dei punti della triangolazione (3)

### METODO DI DECIMAZIONE DI SCHROEDER

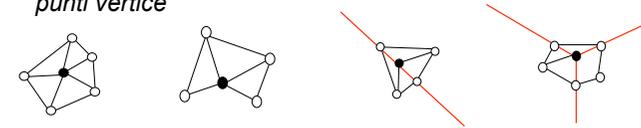
- classificare gli spigoli del poliedro da decimare per individuare quelli rilevanti per l'aspetto, quelli cioè la cui rimozione cambierebbe totalmente la forma del poliedro (ad esempio il bordo di un parallelepipedo). Per decidere se uno spigolo è rilevante per l'aspetto, valutare se l'angolo che le due facce ad esso adiacenti formano supera una certa soglia fissata.
  - Se la supera: non si può eliminare
  - Se non la supera lo spigolo potrebbe teoricamente essere eliminato, ma occorre classificare i punti che lo generano e decidere la loro eventuale eliminazione. ...

## Calcolo dei punti della triangolazione (4)

### METODO DI DECIMAZIONE DI SCHROEDER (segue)

Le classi possibili di punti sono 4:

1. punti interni generici, detti *punti semplici*
2. punti che si trovano sul bordo della superficie, detti *punti contorno*
3. punti che si trovano su uno spigolo rilevante per l'aspetto, detti *punti rilevanti*
4. punti comuni a 3 o più spigoli rilevanti per l'aspetto, detti *punti vertice*



## Calcolo dei punti della triangolazione (5)

### METODO DI DECIMAZIONE DI SCHROEDER (segue)

Consideriamo le 4 classi una ad una e studiamo in quale caso il punto si possa eliminare.



1. I punti semplici si possono eliminare se non danno un contributo troppo significativo: lo eliminiamo se la sua distanza dalla superficie approssimante i vertici di tutti i triangoli che ammettono quel punto come vertice è inferiore ad una certa soglia. Infatti, in tal caso, la rimozione del nodo comporterebbe una limitata deformazione della curvatura della superficie in prossimità del punto.

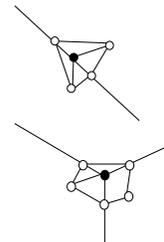


2. Un punto contorno si può eliminare se la sua distanza dalla retta congiungente gli altri punti contorno ad esso adiacenti è inferiore ad una certa soglia.

## Calcolo dei punti della triangolazione (6)

### METODO DI DECIMAZIONE DI SCHROEDER (segue)

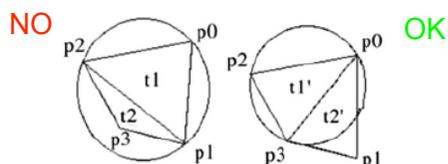
3. Analogamente si decide dell'eliminazione di un punto rilevante, considerando i suoi adiacenti punti rilevanti.
4. Infine, un punto vertice non può mai essere eliminato.



## Calcolo della triangolazione (1)

SECONDO PASSO: calcolo di una triangolazione, fissato l'insieme dei punti

- OSS. è opportuno definire dei triangoli il più possibile regolari e tra punti che siano abbastanza vicini tra loro.
- Tra i tanti metodi: *triangolazione di Delaunay*, che ha appunto questo requisito. Essa ha la proprietà che il cerchio circoscritto a un qualunque triangolo non contiene alcun punto dell'insieme.



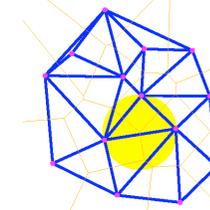
Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

13

## Calcolo della triangolazione (2)

Questa triangolazione viene spesso messa in relazione con il *diagramma di Voronoi*, poiché ne costituisce l'operazione duale.

**DEF.** Il *diagramma di Voronoi* di un insieme di punti, detti *vertici*, è una partizione del piano tale che ogni *cella di Voronoi* di un vertice  $P$  è il luogo dei punti del piano che sono più vicini a  $P$  che a qualunque altro vertice. Il punto  $P$  si chiama *generatore* della cella di Voronoi. Ciascun bordo di una cella di Voronoi è un segmento che biseca il segmento che congiunge  $P$  con il vertice della cella adiacente. Ciascuna intersezione di bordi di una cella di Voronoi (cioè ciascun vertice del poligono che delimita la cella di Voronoi) appartiene almeno a tre celle di Voronoi, ed è il centro del cerchio passante per i generatori di queste tre celle. Questi tre vertici formano un *triangolo di Delaunay*.



Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

## Calcolo della triangolazione (3)

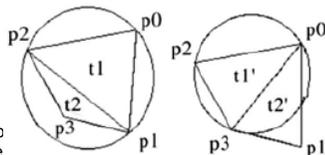
Per calcolare una triangolazione di Delaunay:

PRIMO METODO: passare per il diagramma di Voronoi

SECONDO METODO: Algoritmo di Sibson (flipping)

- INPUT: una triangolazione qualunque
- OUTPUT: una triangolazione di Delaunay
- Per tutte le coppie di triangoli adiacenti  $t_1 = P_0P_1P_2$  e  $t_2 = P_3P_2P_1$ :
  - Se il cerchio circoscritto al triangolo  $t_1$  contiene internamente il vertice  $P_3$ , (oppure il cerchio circoscritto al triangolo  $t_2$  contiene internamente il punto  $P_0$ ) allora questi due triangoli non costituiscono una triangolazione di Delaunay valida e devono essere ridefiniti come  $t'_1 = P_0P_2P_3$  e  $t'_2 = P_0P_1P_3$

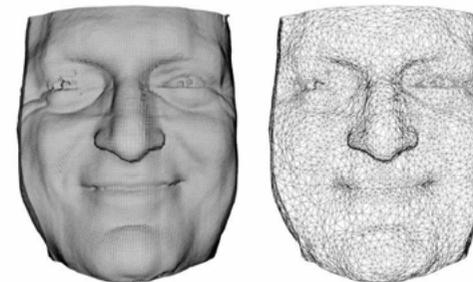
E' possibile dimostrare che l'insieme di queste trasformazioni produce una triangolazione di Delaunay valida.



Algoritmi per la Visualizzazio  
Prof.ssa Tiziana Calamone

## Calcolo della triangolazione (4)

Un esempio dell'intero processo di triangolazione (determinazione dei punti, decimazione e determinazione dei triangoli)



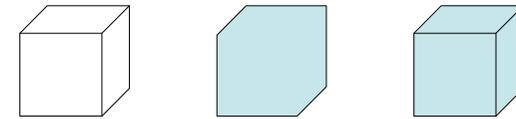
Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

16

## Modelli di illuminazione

## Modelli di illuminazione (1)

- L'uso di un modello di illuminazione è necessario per ottenere una rappresentazione realistica: l'uso del colore e dell'ombreggiatura dà all'immagine bidimensionale un aspetto tridimensionale.
- Quando ogni faccia ha lo stesso colore, le facce si distinguono solo se è presente il bordo.

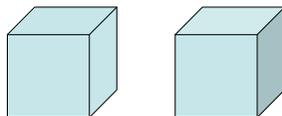


Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

18

## Modelli di illuminazione (2)

- Per mettere in evidenza le singole facce, bisogna individuare le ombre e dare un senso di profondità
- Usiamo un MODELLO DI ILLUMINAZIONE, cioè un modello matematico che descriva l'interazione tra la luce e l'oggetto da rappresentare.



Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

19

## Modelli di illuminazione (3)

- Due categorie di modelli di illuminazione: MODELLI LOCALI e MODELLI GLOBALI.
- MOD. LOCALI: descrivono in modo semplificato le caratteristiche delle sorgenti luminose, degli oggetti e della loro interazione reciproca.
- MOD. GLOBALI: considerano in modo più accurato le interazioni tra le sorgenti luminose, gli oggetti e la luce riflessa dagli oggetti stessi.
- I modelli locali sono in generale dipendenti dal punto di vista, quelli globali sono "view independent"

Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

20

## Modelli di illuminazione (4)

I modelli di illuminazione LOCALI considerano:

- sorgenti di luce puntiformi
- illuminazione ambiente costante
- riflessione diffusiva o speculare approssimata

I modelli GLOBALI tengono conto anche di caratteristiche fotometriche e radiometriche delle sorgenti:

- composizione spettrale della luce emessa
- energia e geometria della emissione
- forma del corpo illuminante
- luce ambiente modellata

Qui ci limiteremo ai soli MODELLI LOCALI.

## Modelli di illuminazione (5)

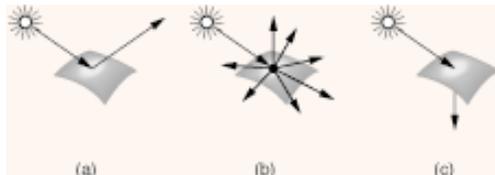
A livello di MODELLO FISICO, il modo in cui la radiazione luminosa viene riflessa (e quindi vista!!) da una superficie dipende da:

- **lunghezza d'onda**  $\lambda$
- **angolo di incidenza** tra superficie e radiazione luminosa  $\theta$
- **natura e microstruttura superficiale** del materiale, più altre proprietà fisiche del materiale, come permeabilità e conduttività (tramite  $\rho$ )

Bisogna tener conto di tutti questi parametri per costruire il modello di illuminazione.

## Modelli di illuminazione (6)

- Quando la luce colpisce una superficie, una parte viene da essa assorbita mentre una parte ne viene riflessa.
- Rispetto a come e quanto la luce viene riflessa distinguiamo:

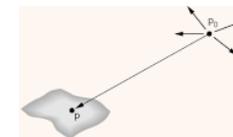


a. sup. speculare, b. sup. diffusiva, c. sup. trasparente

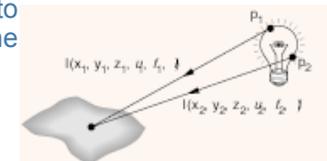
## Modelli di illuminazione (7)

SORGENTI DI LUCE:

- puntiformi



- \* estese. In tal caso, il contributo totale sulla superficie si ottiene integrando nello spazio



## Modelli locali

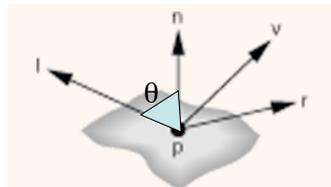
## Modelli locali (1)

- I modelli locali considerano l'interazione tra la luce prodotta dalle sorgenti e gli oggetti presi singolarmente, **SENZA** considerare interazioni tra essi o con l'ambiente.
- La grandezza fisica da considerare per i modelli di illuminazione locali è l'**intensità luminosa spettrale**  $I(\lambda)$ .

## Modelli locali (2)

### GEOMETRIA DEI MODELLI LOCALI

- $n$  normale alla sup. in  $p$
- $v$  direzione da  $p$  al pto di osservazione
- $l$  direzione da  $p$  a sorgente di luce
- $r$  direzione di riflessione calcolata da  $n$  e  $l$

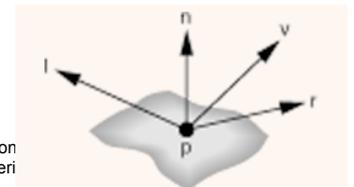


## Modelli locali (3)

### RIFLESSIONE NEI MODELLI LOCALI:

La riflessione può essere di tre tipi.

- **riflessione speculare perfetta**  $l \cdot n = r \cdot n$  e la luce viene riflessa lungo un'unica direzione
- **riflessione speculare imperfetta**: la luce riflessa all'interno di un angolo solido con intensità massima nella direzione  $r$ , e decrescente a 0 al limite dell'angolo solido (bagliori)
- **riflessione diffusiva**: costante in tutte le direzioni



## Modelli locali (4)

MODELLO DI LAMBERT (1760):

- E' il modello più semplice e descrive il comportamento di **superfici perfettamente diffuse** illuminate da **sorgenti puntiformi**.
- La luce viene riflessa in tutte le direzioni, in modo che l'intensità sia massima nella direzione della sorgente e minima nella direzione ortogonale
- Intensità della luce riflessa dall'oggetto:

$$I_r(\lambda) = I(\lambda) \rho_d \cos\theta$$

intensità riflessa

riflessività spettrale della sup. diffusiva

intensità della sorgente

visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

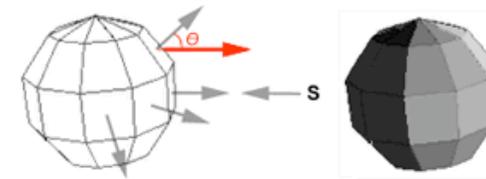
N.B. la luce riflessa da un pto della superficie è indipendente dalla posiz. dell'osservatore

visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

## Modelli locali (5)

MODELLO DI LAMBERT (segue):

$$I_r(\lambda) = I(\lambda) \rho_d \cos\theta$$



E' facile associare ad ogni faccia di un poliedro una intensità riflessa in qualsiasi direzione.

N.B. Le facce non illuminate hanno intensità riflessa = 0

Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

30

## Modelli locali (6)

LUCE AMBIENTALE

Oltre alla riflessione diretta della luce, si devono considerare anche le riflessioni reciproche tra gli oggetti (*inter-riflessioni*).

Nei modelli locali, questo effetto viene simulato sotto forma di **illuminazione ambientale**, che fa sì che nessuna superficie risulti completamente oscura.

L'illuminazione ambientale è caratterizzata da una intensità costante in ogni punto della scena.

Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

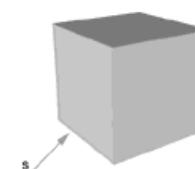
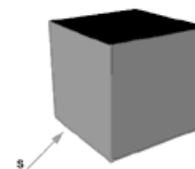
31

## Modelli locali (7)

LUCE AMBIENTALE (segue)

... infatti, il modello di Lambert fornisce immagini con molto contrasto: le parti illuminate riflettono una grande quantità di energia, mentre quelle in ombra appaiono molto scure.

Con la luce ambientale, l'energia totale riflessa aumenta, ma è distribuita in modo più uniforme.



$$I_r(\lambda) = I(\lambda) \rho_d \cos\theta + I_a(\lambda) \rho_a$$

componente di Lambert

componente ambientale

Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

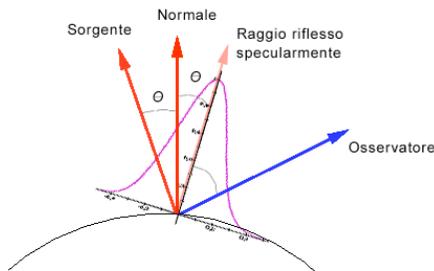
32

## Modelli locali (8)

### MODELLO DI PHONG (1973)

Modello di Lambert: per superfici perfettamente diffuse  
 Modello di Phong: per superfici con riflessione speculare (bagliori)

N.B. La presenza dei bagliori dipende dalla direzione dell'osservatore!



quanto più l'osservatore vede la scena nella direzione del raggio riflesso specularmente, tanto maggiore è l'effetto di lucentezza

zione  
neri

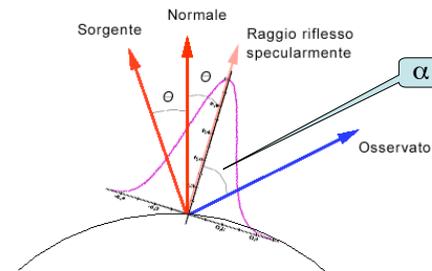
33

## Modelli locali (9)

### MODELLO DI PHONG (segue)

Sia  $\alpha$  l'angolo con cui l'osservatore vede un pto riflesso.  
 Quanto più  $\alpha$  si avvicina a 0, tanto maggiore sarà l'intensità del raggio riflesso.

Viceversa, al crescere di  $\alpha$ , questa intensità dovrà decrescere molto più rapidamente del caso lambertiano.



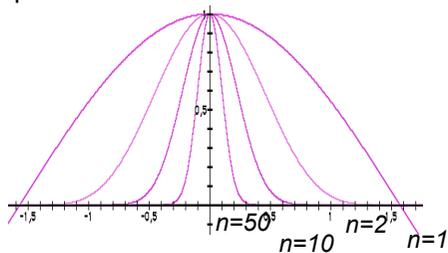
zione  
neri

34

## Modelli locali (10)

### MODELLO DI PHONG (segue)

Una funzione che descrive questo comportamento è  $\cos^n \alpha$ , dove  $n$  può assumere valori molto alti.



## Modelli locali (11)

### MODELLO DI PHONG (segue)

funzione di riflessione speculare  $W(\theta, \lambda)$ , che dipende dall'angolo di incidenza della luce e dalla lunghezza d'onda.

$$I_r(\lambda) = I(\lambda)\rho_d \cos\theta + I_a(\lambda)\rho_a + I(\lambda)W(\theta, \lambda)\cos^n \alpha$$

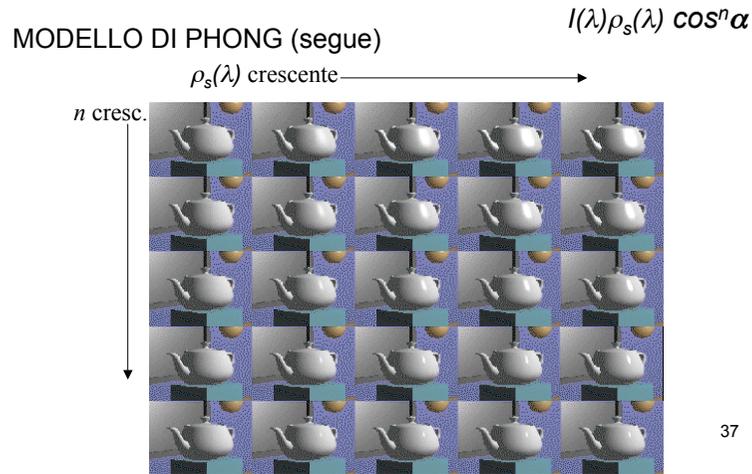
componente di Lambert

componente ambientale

componente di Phong

per semplificare: la funz. di rifl. spec.  $W$  viene supposta indipendente da  $\theta$ , e si riduce quindi al coeff.  $\rho_s(\lambda)$ .

## Modelli locali (12)



## Modelli locali (13)

### ATTENUAZIONE DELLA LUCE

Le sorgenti di luce emettono luce in tutte le direzioni, ma l'energia emessa si attenua inversamente al quadrato della distanza.

Quindi, una sorgente vicina e una lontana non possono produrre lo stesso effetto.

Per simulare questo fenomeno, aggiungiamo il **coefficiente di attenuazione**  $k_{att}$ :

$$k_{att} = \max((c_1 + c_2 d_L + c_3 d_L^2)^{-1}, 1)$$

dist. della sorg.  
dal pto

Algoritmi per la Vi  
Prof.ssa Tiziana

le 3  $c_i$  scelte in modo  
che il den. non sia =0

38

## Modelli locali (14)

### ATTENUAZIONE DELLA LUCE (segue)

Questo coeff. fa aggiunto nella parte relativa ai modelli di Lambert e Phong.

MODELLO COMPLETO:

$$I_r(\lambda) = I_a(\lambda)\rho_a + I(\lambda)k_{att}(\rho_d \cos \theta + W(\theta, \lambda) \cos^n \alpha)$$

Ombreggiatura

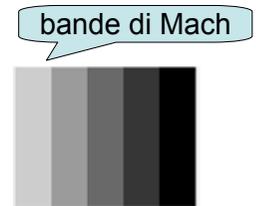
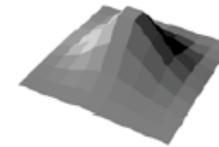
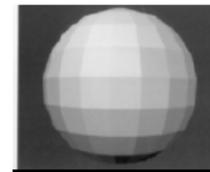
## Ombreggiatura (1)

- I **modelli di ombreggiatura** sono quelle strutture generali che regolano punto per punto gli argomenti e l'impiego dei modelli di illuminazione.
- Il modello di ombreggiatura più semplice è quello che prevede il calcolo della normale e l'applicazione del modello di illuminazione per ogni punto.
- Questo tipo di approccio è molto dispendioso, pertanto si rende necessaria l'introduzione di nuovi modelli, meno accurati ma anche meno costosi.

## Ombreggiatura (2)

### FLAT SHADING

- E' il metodo più semplice per un poligono.
- Idea base: applicare il modello di illuminazione una sola volta in un punto campione per ogni faccia, determinandone il valore di intensità.
- Nel caso in cui la superficie sia piana: buoni risultati
- Nel caso in cui le superfici siano delle approssimazioni risultano sfaccettate e non uniformi.



## Ombreggiatura (3)

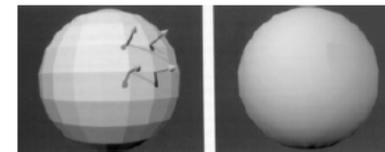
### FLAT SHADING (segue)

- Per risolvere il problema si usa una tecnica di smoothing. Ci sono due tecniche comunemente adottate:
  - interpolazione di Gourard implementata a livello hardware su tutte le recenti schede grafiche 3D
  - interpolazione di Phong implementata a livello hardware solo sulle più recenti e costose schede grafiche 3D

## Ombreggiatura (4)

### OMBREGGIATURA DI GOURARD

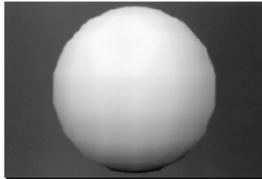
- I poligoni vengono illuminati indipendentemente dalla posizione dell'osservatore (no Phong).
- Si considerano le normali alla superficie nei vertici del poligono e per ciascuno si calcola l'intensità
- Nei punti interni al poligono l'intensità non è costante ma determinata dall'interpolazione bilineare di quella nei vertici
- La continuità è garantita tra poligoni adiacenti.



## Ombreggiatura (5)

### OMBREGGIATURA DI GOURARD (segue)

- **ATTENZIONE:** anche se la continuità di illuminazione tra poligoni adiacenti rende l'aspetto di una superficie curva, questa è sempre poliedrica!
- si vede dai contorni...



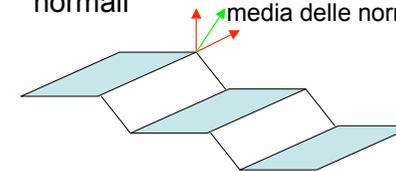
Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

45

## Ombreggiatura (6)

### OMBREGGIATURA DI GOURARD (segue)

- **PRO:** facilità di calcolo della luminosità
- **CONTRO:** rischio di annullare la curvatura, perché la normale in un vertice alla superficie è la media delle normali



la superficie  
apparirà piatta  
anziché ondulata

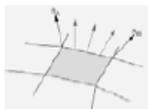
Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

46

## Ombreggiatura (7)

### OMBREGGIATURA DI PHONG

- Per consentire di introdurre bagliori
- Anziché interpolare la luminosità, vengono interpolate le normali.
- Solo in seguito si calcola la luminosità del punto



Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

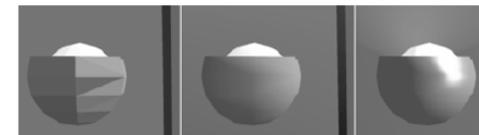
47

## Ombreggiatura (8)

### OMBREGGIATURA DI PHONG (segue)

- **PRO:** immagine migliore rispetto a Gourard, superfici visualizzate correttamente, possibilità di bagliori
- **CONTRO:** calcolo molto pesante

Flat Gourard Phong



Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

48

## Ombre proiettate

## Ombre proiettate (1)

- Fin ora abbiamo considerato il sistema formato da:
  - sorgente di luce
  - osservatore
  - oggetto
- Se la scena comprende più oggetti, essi proiettano delle ombre gli uni sugli altri.
- Il punto in ombra non riceve luce dalla sorgente ma solo luce ambientale.

## Ombre proiettate (2)

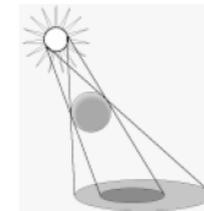
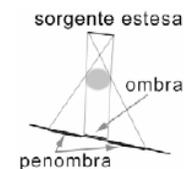
- Per calcolare il valore della luminosità in tale punto, basta inserire nell'equazione del modello di illuminazione locale un **coefficiente di occlusione  $s$** , che vale 0 se il punto è in ombra e vale 1 altrimenti:

$$I_r(\lambda) = I_a(\lambda)\rho_a + I(\lambda) s k_{att}(\rho_d \cos\theta + W(\theta, \lambda) \cos^n \alpha)$$

## Ombre proiettate (3)

### COSTRUZIONE DELLE SUPERFICI IN OMBRA

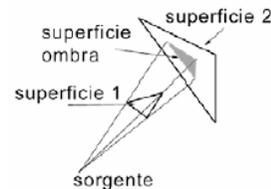
- consideriamo solo sorgenti puntiformi, perché le sorgenti estese complicano le cose:



## Ombre proiettate (4)

COSTRUZIONE DELLE SUPERFICI IN OMBRA (segue)  
METODO DI ATHERTON, WEILER, GREENBERG

- fase 1:  
calcolare le superfici d'ombra per ogni sorgente, considerata come centro di una proiezione prospettica.  
N.B. su ogni oggetto si generano nuovi poligoni, completamente in luce o completamente in ombra
- fase 2:  
tutte le superfici vengono proiettate dal punto di vista dell'osservatore

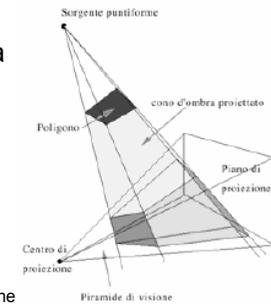


Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

## Ombre proiettate (5)

COSTRUZIONE DELLE SUPERFICI IN OMBRA (segue)  
METODO DEI VOLUMI D'OMBRA

- creare un volume virtuale che rappresenta il cono d'ombra proiettato da un oggetto
- intersecare questo volume con la piramide di visione, determinando una regione dello spazio all'interno della quale tutti gli oggetti sono in ombra rispetto alla sorgente.



Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

## Ombre proiettate (6)

COSTRUZIONE DELLE SUPERFICI IN OMBRA (segue)  
METODO DEI VOLUMI D'OMBRA

- se sono presenti più sorgenti di luce, ogni oggetto proietta un differente cono d'ombra e l'intersezione tra essi aiuta a computare le penombre.
- Con questa tecnica si può anche simulare una sorgente estesa che proietta ombra e penombra, creando più coni d'ombra con i vertici molto vicini, uno per ciascuna sorgente puntiforme fittizia.

Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

55

## Conclusioni

- Il *livello di realismo* permesso dai vari modelli di illuminazione varia molto, così come varia la complessità computazionale
  - più sofisticato è il modello, maggiore è il suo costo computazionale (approssimativamente, cresce esponenzialmente con il realismo)
- Nella scelta di un modello si deve valutare il più alto livello di realismo ottenibile ad un costo computazionale sostenibile.
- Le unità in gioco sono:
  - potenza di calcolo
  - complessità media del sistema (# di poligoni)
  - tempo reale?
  - # totale di immaginazione da produrre

Algoritmi per la Visualizzazione  
Prof.ssa Tiziana Calamoneri

56