Marco Tarini - Computer Graphics 2025/2026
Università degli Studi di Milano

Approcci al rendering 2/2: rasterization-based (intro)

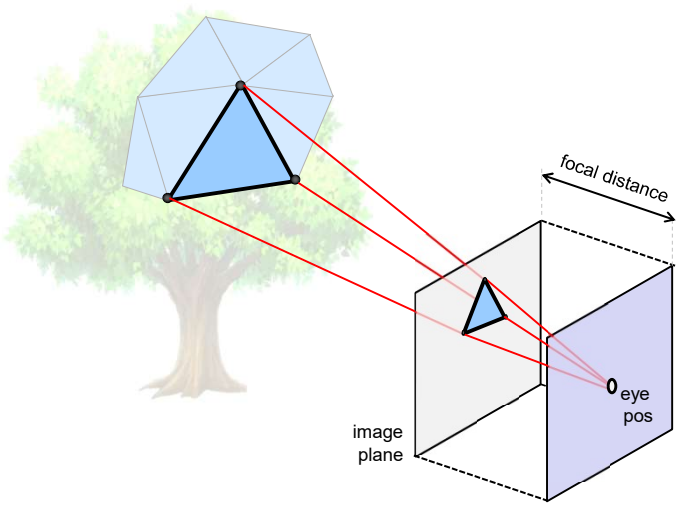
71

Algoritmi di rendering: due categorie

- ✓Bastati su Ray-tracing:
  - ⇒*per ogni pixel*:
    lancio un raggio;
    trovo le intersezioni del raggio con le primitive;
    determino il colore del punto colpito
    (per es, calcolando le luci da cui è raggiunto,
    l'illuminazione…)
- ✓Basati su Rasterization
  - ⇒*per ogni primitiva*:
  - ⇒la proietto sullo schermo, in 2D ("trasformazione")
  - ⇒converto la forma 2D in pixel ("rasterizzazione")
  - ⇒determino il colore di questi pixel ("lighting")

72

Rasterization based rendering



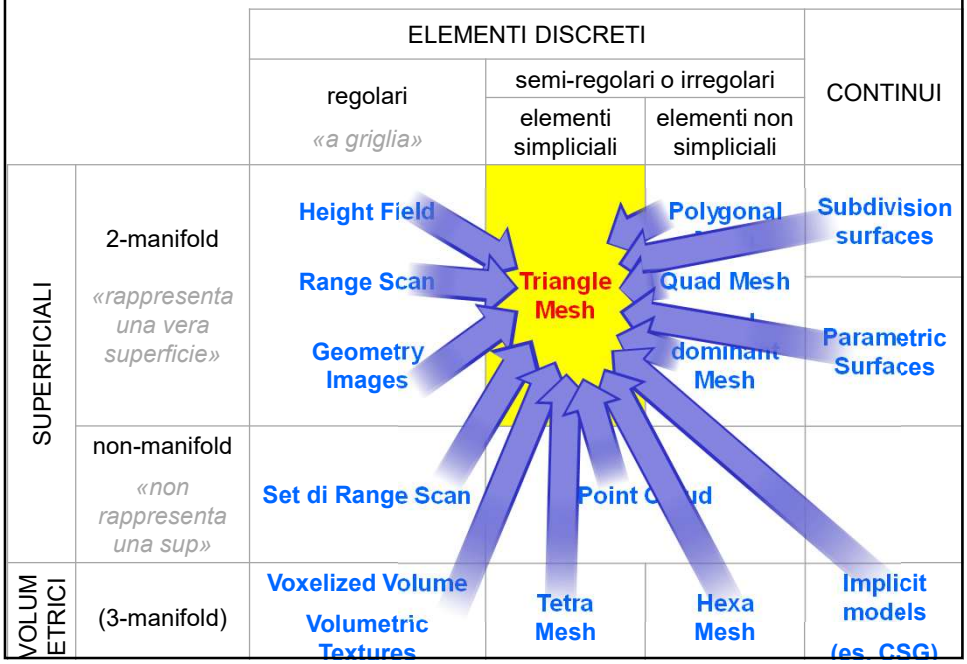
74

Algoritmi di rendering basati su rasterizzazione

- ✓ Sono resi molto popolari dal supporto di Hardware specializzato: GPU
  - ⇒ è proprio l'algoritmo per cui questo Hardware è stato originalmente pensato e progettato!
  - ⇒ Rendering accelerato con GPU: necessario per rendering in tempo reale (per es, videogame)
  - ⇒ (Recentemente: anche algoritmi basati su ray-tracing vengono spesso accelerati su GPU)
- ✓ La principale (e quasi unica) primitiva di rendering supportata è il triangolo
  - ⇒ Cioè, la GPU è in grado rasterizzare triangoli
- ✓ Dunque, l'Hardware-supported rendering in tempo reale è soprattutto rendering di Tri-meshes
  - ⇒ E' questo il motivo per il quale, nella prima metà del corso, ci siamo occupati così spesso di come convertire qualsiasi altro tipo di modello in una mesh triangolare

75

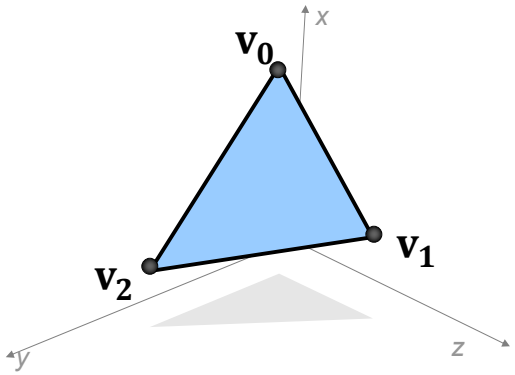
Al fine di eseguire rendering (rasterization based)



76

Rasterization-based rendering (HW supported)

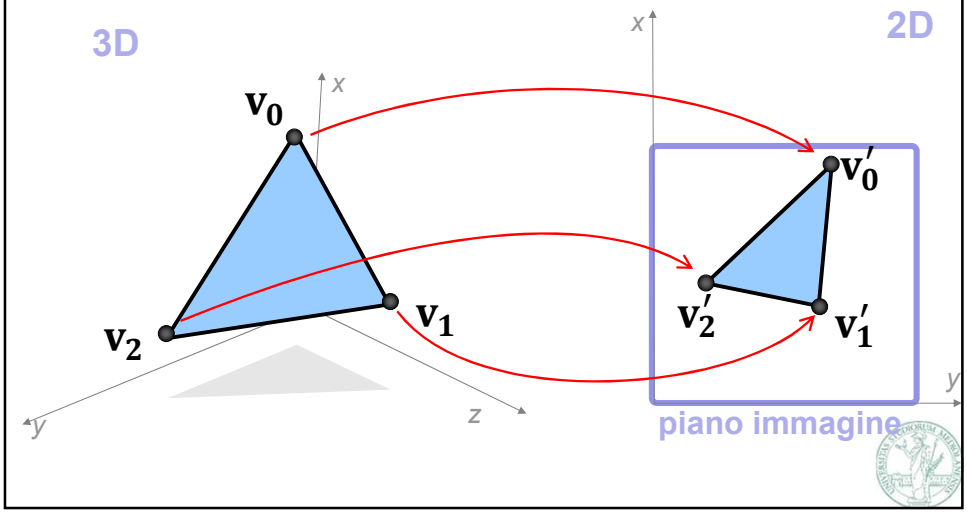
- ✓ L'intera scena è composta da triangoli 3D
- ✓ Ipotesi: possiamo limitarci a supportare il triangolo come unica primitiva di rendering (per superfici)



77

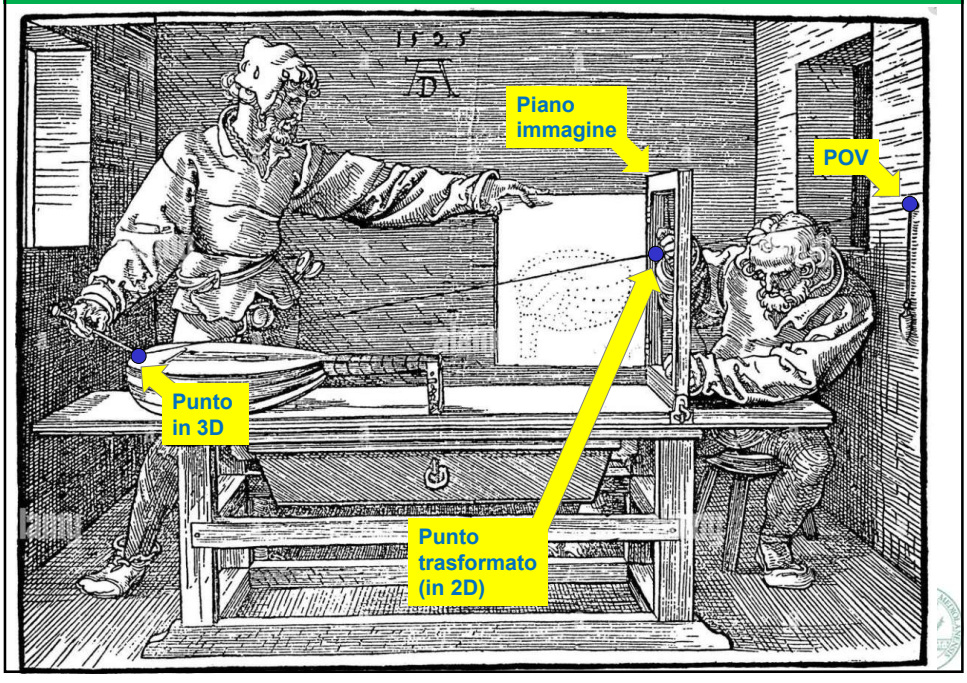
Trasformare un triangolo (per es, da 3D a 2D)

1. trasformare ciascuno dei suoi tre vertici,
2. connetterli formando in un nuovo triangolo (2D)



78

In fondo, l'idea non è nuova



79

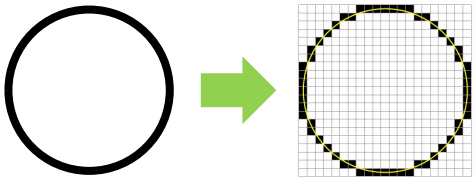
"Rasterization" (o "scanline conversion"):

Conversione di una forma 2D…

- come, per es: poligoni, splines, linee, testo, etc …

…in pixel

- di un'immagine raster



Jim Blinn, pionere e guru della Computer Graphics colleziona algoritmi per rasterizzare cerchi (per hobby)

80

Rasterizzare (convertire in pixel) un triangolo

✓ Task: trovare quali «frammenti» generare

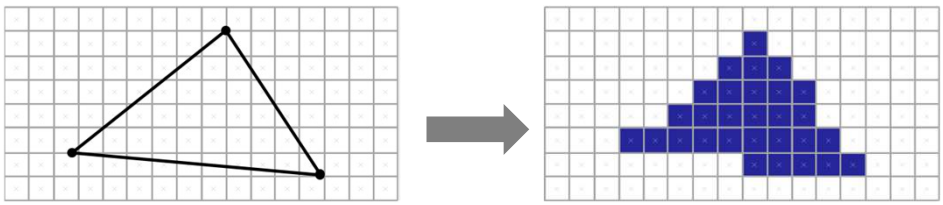
⇒ uno per ogni pixel dell'immagine output contenuto dal triangolo 2D

⇒ (nota: è un task che svolgiamo in 2D, sull'immagine)

⇒ «Frammento» = un piccolo pacchetto di dati per il quale vogliamo generare un pixel (contiene esempio: normale, colore di base, materiale…)

⇒ Nota: lo distinguiamo da «pixel»: il colore RGB finale generato per un dato frammento

⇒ Nota: il frammento viene dotato degli attributi per vertice interpolati!



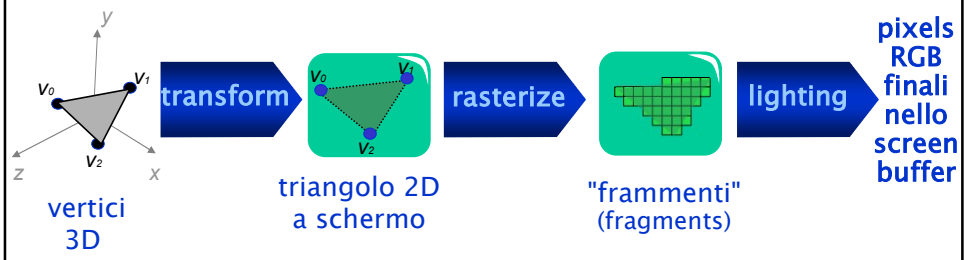
81

Anche detto T&L: Transform & Lighting

- ✓ *Transform* :
  - ⇒ trasformazioni di sistemi di coordinate
  - ⇒ scopo: portare le primitive in spazio schermo
- ✓ *Lighting* :
  - ⇒ computo illuminazione
  - ⇒ scopo: calcolare il colore RGB finale di ogni pixel della immagine finale

83

Rasterization-Based Rendering: il pipeline



84

Rasterization-based rendering (di una tri-mesh)

- ✓ Input: una mesh (array di vertici e triangoli)
- ✓ L'algoritmo a pipeline (catena di montaggio) consiste in diverse fasi (stage della catena):

1. Fase per vertice:
   ogni vertice viene portato in una posizione 2D sullo schermo
   - ⇒ Si tratta di una "trasformazione spaziale"
2. Fase per triangolo:
   ogni triangolo 2D viene rasterizzato a schermo
   - ⇒ Viene cioè identificato un "frammento" per ogni pixel coperto dal triangolo 2D
3. Fase per frammento
   - ⇒ Per ogni frammento, si computa il colore RGB del pixel corrispondente (tipicamente, calcolando l'illuminazione)

87

Considerazioni generali sul Pipeline

- ✓ Le fasi, che sono in cascata, avvengono in parallelo
  - ⇒ Mentre processo (trasformo) i vertici di un triangolo, sto anche processando (rasterizzando) il triangolo precedente, e processando (computando il lighting) dei frammenti del triangolo generato ancora prima
- ✓ Ogni fase del pipeline avviene in parallelo
  - ⇒ Ogni vertice, triangolo, frammento può essere processato in contemporanea con altri
- ✓ Il pipeline procede tanto velocemente quanto la sua fase più lenta
  - ⇒ Che è detta «il collo di bottiglia» (bottleneck)
- ✓ Terminologia per il pipeline di rendering
  - ⇒ Se il bottleneck è nella fase per vertice, l'applicazione si dice «transform limited» o «geometry limited»: non riesce ad effettuare abbastanza trasformazioni geometriche (ad esempio, la mesh ha una risoluzione troppo elevata)
  - ⇒ Se è nella fase per frammento, l'applicazione si dice «fill limited»: non riesce a riempire il buffer di pixel abbastanza velocemente (ad esempio, l'immagine di output ha una risoluzione troppo elevata)

88

Rendering Algorithms Paradigms: in breve

RAY-TRACING

```
For each image pixel p:
  make a ray r
  for each primitive o in scene:
     if intersect(r,o)
     then find color for o
          color p with it
```

LIGHTING

RASTERIZATION BASED:

```
For each primitive o:
  find where o falls on screen
  rasterize 2D shape
  for each produced pixel p :
    find color for o
    color p with it
```

PROJECTION 3D → 2D (aka TRANSFORM)

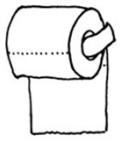
LIGHTING

89

Rendering Algorithms paradigms: ancora più in breve

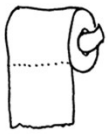
RAY-TRACING

```
for each pixel:
   for each primitive
```



RASTERIZATION

```
for each primitive:
   for each pixel
```



90

THE GREAT DEBATE

RASTERIZATION
VS
RAY-TRACING

91

Ray-tracing : semplicità ed eleganza?

```
typedef struct{double x,y,z}vec;vec U,black,amb={.02,.02,.02};struct sphere{
vec cen,color;double rad,kd,ks,kt,kl,ir}*s,*best,sph[]={0.,6.,.5,1.,1.,1.,.9,
.05,.2,.85,0.,1.7,-1.,8.,-.5,1.,.5,.2,1.,.7,.3,0.,.05,1.2,1.,8.,-.5,.1,.8,.8,
1.,.3,.7,0.,0.,1.2,3.,-6.,15.,1.,.8,1.,.7,.0,.0,0.,.6,1.5,-3.,-3.,12.,.8,1.,
1.,5.,0.,0.,0.,.5,1.5,};yx;double u,b,tmin,sqrt(),tan();double vdot(A,B)vec A
,B;{return A.x*B.x+A.y*B.y+A.z*B.z;}vec vcomb(a,A,B)double a;vec A,B;{B.x+=a*
A.x;B.y+=a*A.y;B.z+=a*A.z;return B;}vec vunit(A)vec A;{return vcomb(1./sqrt(
vdot(A,A)),A,black);}struct sphere*intersect(P,D)vec P,D;{best=0;tmin=1e30;s=
sph+5;while(s-->sph)b=vdot(D,U=vcomb(-1.,P,s->cen)),u=b*b-vdot(U,U)+s->rad*s
->rad,u=u>0?sqrt(u):1e31,u=b-u>1e-7?b-u:b+u,tmin=u>1e-7&&u<tmin?best=s,u:
tmin;return best;}vec trace(level,P,D)vec P,D;{double d,eta,e;vec N,color;
struct sphere*s,*l;if(!level--)return black;if(s=intersect(P,D));else return
amb;color=amb;eta=s->ir;d= -vdot(D,N=vunit(vcomb(-1.,P=vcomb(tmin,D,P),s->cen
)));if(d<0)N=vcomb(-1.,N,black),eta=1/eta,d= -d;l=sph+5;while(l-->sph)if((e=l
->kl*vdot(N,U=vunit(vcomb(-1.,P,l->cen))))>0&&intersect(P,U)==l)color=vcomb(e
,l->color,color);U=s->color;color.x*=U.x;color.y*=U.y;color.z*=U.z;e=1-eta*
eta*(1-d*d);return vcomb(s->kt,e>0?trace(level,P,vcomb(eta,D,vcomb(eta*d-sqrt
(e),N,black))):black,vcomb(s->ks,trace(level,P,vcomb(2*d,N,D)),vcomb(s->kd,
color,vcomb(s->kl,U,black))));}main(){printf("%d %d\n",32,32);while(yx<32*32)
U.x=yx%32-32/2,U.z=32/2-yx++/32,U.y=32/2/tan(25/114.591559026l),U=vcomb(255.,
trace(3,black,vunit(U)),black),printf("%.0f %.0f %.0f\n",U);}/*minray!*/
```

un intero raytracer (in C) su una business card :-P !
(by Paul Heckbert)

94

Render farms

- ✓ Il rendering di entrambi i tipi sono massicciamente paralelizzabili (sono cioè caratterizzati da un elevato livello di *Parallelismo Implicito*)
- ✓ Per avvantaggiarsene, abbiamo bisogno di hardware parallelo
- ✓ Per es, per gli algoritmi di ray-tracing…

Pixar/Disney Render Farm

95

Vantaggi degli approcci basati su rasterizzazione

- ✓ Complessità lineare con numero di primitive
- ✓ Per ogni primitiva, si processano solo i pixel coinvolti – migliore scalabilità / efficienza?
- ✓ Attualmente possono contare sul pieno supporto GPU, su qualsiasi piattaforma

  ⇒E' la classe di algoritmo per la quale le GPU sono state pensate

96

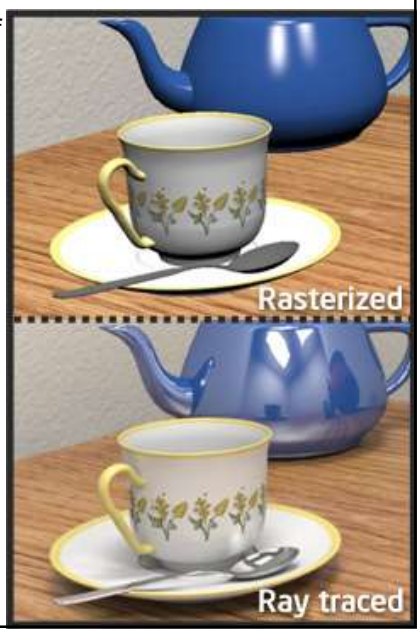
Visione storica / tradizionale (i luoghi comuni 1/2)

- ✓Ray-tracing based
  - ⇒**Lento**, ma ottima qualità di immagini
  - ⇒Il tipo di algoritmo standard per il **rendering offline**
  - ⇒Per esempio, usato nella **movie industry**
  - ⇒Alcuni software noti di ray-tracer / path-tracer: **POV-ray**, **Renderman** (pixar), **YafaRay**, **Mitsuba**
- ✓Rasterization based
  - ⇒**Veloce**, ma approssimato: no effetti complessi.
  - ⇒Il tipo di algoritmo standard per il **rendering online**
  - ⇒Per esempio, usato nella **game industry**
  - ⇒Alcuni API basati su rasterization based: **OpenGL**, **WebGL**, **DirectX**, **Metal**, **Vulkan**

97

Il dibattito dura da decenni

"Real Time Ray-Tracing: The End of Rasterization?" (Jeff Howard, 2007)



99

I luoghi comuni 2/2

✓ Raytracing :

⇒effetti visuali complessi → realismo

- ombre, riflessioni speculari, rifrazioni, riflessioni multiple...

⇒*quindi:* perfetto per rendering hi-quality ma offline

⇒Il rendering della **movie industry**

✓ Rasterization:

⇒veloce

- per ciascuna primitiva, processa solo i pixel coinvolti (invece di: per ogni pixel, processa tutte le primitive)

⇒*quindi:* perfetto per il rendering real-time ma approssimato

⇒Il rendering della **game industry**

101

La realtà: raytracing non è necessariamente lento

Perché…

⇒È anch'esso intrinsecamente parallelizzabile

- alto livello di **parallelismo implicito**
- quindi, implementabile con HW parallelo (per es, render farms)

⇒Le primitive possono essere più varie ed espressive

- Ciascuna primitiva rappresenta una forma più articolata
- Riduce drasticamente il numero di primitive necessarie a comporre la scena virtuale

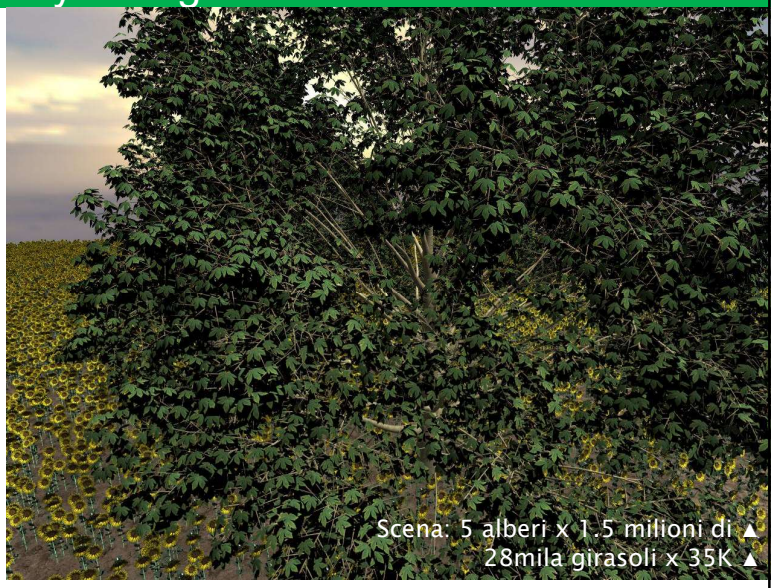
⇒Ma soprattutto, **Ottimizzazioni**:

- Usando apposite strutture dati «furbe», è possibile ridurre fortemente il numero di primitive testate per ogni raggio
- Nota: è un po' più arduo per scene animate (ma possibile)

102

Real-time raytracing?

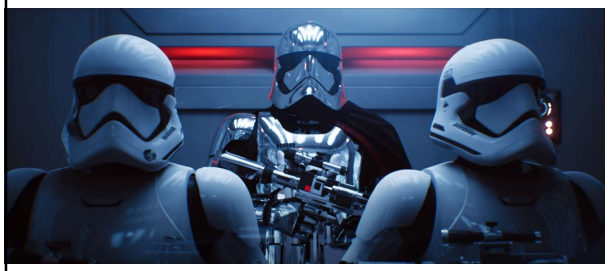
Un precursore → (su HW specializzato per questo caso)



OpenRT Project
inTrace Realtime Ray Tracing Technologies GmbH
MPI Informatik, Saarbrueken - by Ingo Wald et al , 2004

103

Oggi: real-time raytracing sta diventando comune



Real-time Raytracing in Unity (2019)

Real-time Raytracing by Unreal + Nvidia (2019)

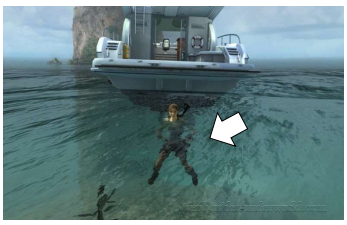
106

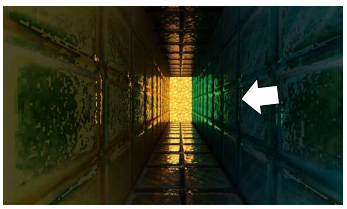
La realtà: rasterization based può riprodurre effetti compessi e ralistici

- ✓ Esistono algoritmi basati sul rasterization per simulare, oppure approssimare:
  - ⇒ Occlusioni («gli oggetti più vicini alla camera nascondono quelli dietro»). (ebbene sì: abbiamo bisogno di un'apposita strategia, che vedremo, anche solo per riprodurre questo naturale stato di cose)
  - ⇒ Ombre portate (sia «soft» che «hard»)
  - ⇒ Diffrazioni
  - ⇒ Riflessioni speculari
  - ⇒ Riflessioni multiple (illuminazione «globale»)
  - ⇒ Rifrazioni e semitrasparenze
  - ⇒ …e altri effetti che sono facilmente gestiti con algoritmi di ray-tracing
- ✓ Si tratta di altrettanti algoritmi e tecniche specializzate, ciascuna pensata per riprodurre un effetto nel rendering
  - ⇒ Sono tecniche spesso adottate nei videogames
  - ⇒ Nota: non sempre combinarle insieme è semplice e diretto
  - ⇒ Vedere corso di Real Time Graphics Programming! (alla magistrale)

107

La realtà: rasterization based supporta effetti di luce compessi e realistici

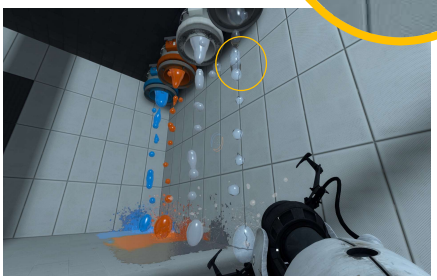




108

La realtà: rasterization based supporta effetti di luce compessi

Fenomeni di Rifrazione (approssimati)



Portal 2 (Valve, 2011)

110

La realtà: rasterization based supporta effetti di luce compessi

Fenomeni di riflessione speculare su superfici piatte

Detroit Becoming Human (Quantic Dream 2018)

Fenomeni di riflessione speculare su superfici curve (approssimati)

SuperMario 64 (Nintendo 1996)

GranTurismo 7 (Polyphony Digital 2027)

111

Lo stato attuale dell'industria di intrattenimento

- ✓ Da sempre, l'industria cinematografica si avvale quasi esclusivamente di algoritmi basati su ray-tracing
  - ⇒ Per il rendering finale (offline)
  - ⇒ Ma usa algoritmi basati su rasterization per: effettuare preview (real time), per costruire asset (ad esempio, modellare le mesh), etc
  - ⇒ Rendering finale: parallelizzato massicciamente su render farms, ma cmq spesso lento (ore o anche decine di ore per fotogramma)
- ✓ L'industria dei videogames si avvale ancora, in maggioranza, di algoritmi basati su rasterization
  - ⇒ Accelerati su GPU consumer-level
  - ⇒ Dunque i modelli 3D usati sono sempre tri-meshes
  - ⇒ Trend recente (ancora difficile valutarne la portata): passaggio ad algoritmi di ray-tracing, oppure misti

112

La soluzione del dibattito

> *Rasterization is fast,*
> *but needs cleverness*
> *to support complex visual effects.*
>
> *Ray-tracing supports complex visual effects,*
> *but needs cleverness*
> *to be fast.*
>
> David Luebke (NVIDIA)

114