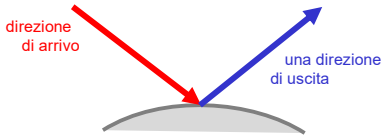
Modelli (semplificati) di riflessione della luce

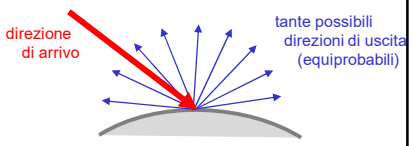
✓ Riflessioni speculari

⇒ luce rimbalza come una pallina da ping-pong su di un tavolo



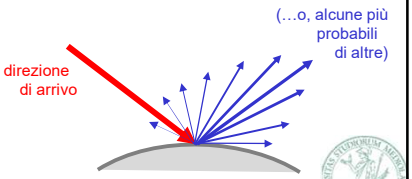
✓ Riflessioni diffusive

⇒ luce riflessa in ogni direzione possibile in egual misura



✓ Vie di mezzo: "glossy"

⇒ luce riflessa in ogni direzione, ma maggiormente in quelle simili alla direzione speculare



56

Ray tracing: varianti

Nota: questa terminologia può variare leggermente da un testo all'altro

✓ Molti algoritmi e varianti si basano su principi simili.

✓ Alcuni di questi:

⇒ Ray-casting:
- un solo raggio (primario) viene "mandato" (*cast*) per pixel
- quello che abbiamo fatto in lab è un esempio!

⇒ Ray-tracing:
- Ogni raggio viene "tracciato" (*traced*) attraverso vari fenomeni di successive riflessione o rifrazione, con raggi secondari
- Nota: in ordine inverso rispetto alla realtà, come al solito
- (è anche il usato come nome della classe generale di questi algoritmi)

⇒ Path-tracing:
- Per ogni pixel, lanciare molti raggi, che seguono i path casuali ("monte carlo sampling")
- Mediare i risultati per ottenere il pixel finale
- Più raggi vengono mandati, maggiore il realismo

⇒ Ray-marching:
- Una classe di algoritmi per accelerare l'intersezione raggio primitiva
- Principio: raggio viene spezzato in una serie di passi (segmenti) successivi, ciascuno dei quali deve testare solo le primitive a lui vicine (invece di tutte)

57

Marco Tarini - Computer Graphics 2020/2021
Università degli Studi di Milano

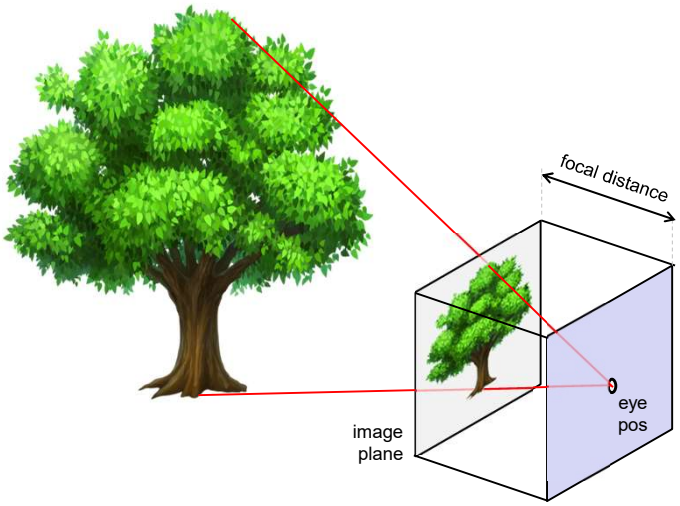
Rendering Overview: Rasterization

58

PART 2: *the other main approach*

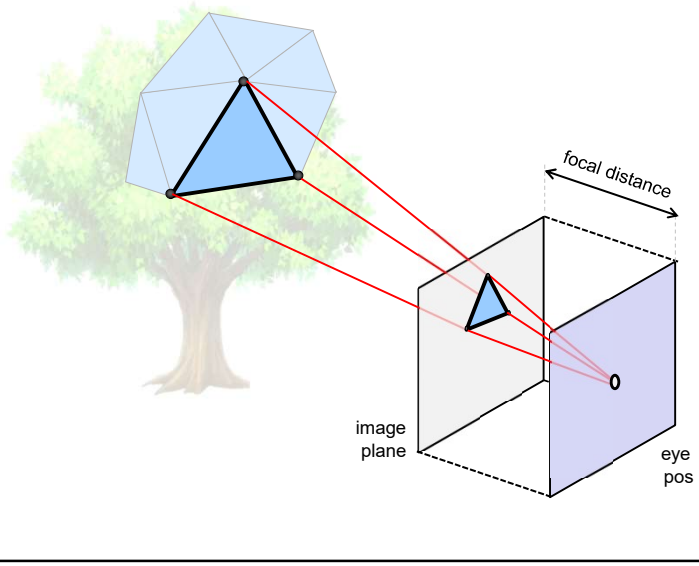
59

PART 2: *the other main approach*



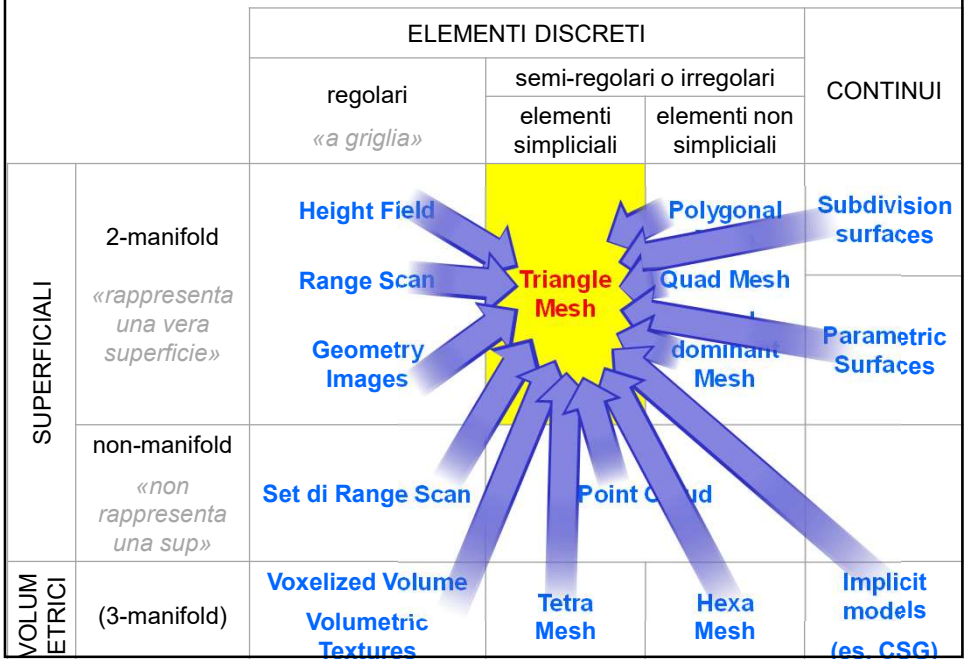
60

PART 2: *the other main approach*



61

Al fine di eseguire rendering (rasterization based)



62

Rendering Algorithms Paradigms

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

63

to “Rasterize”: (or “scanline conversion”)

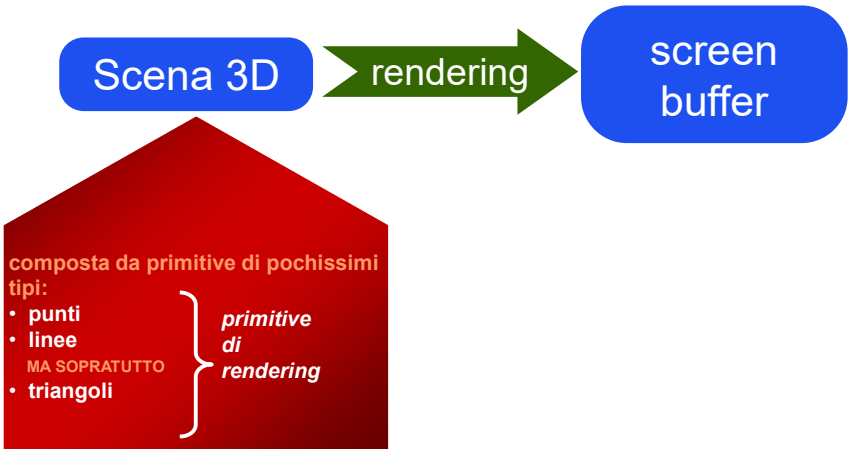
- ✓ convert a 2D shape…
  - e.g.: text, polygons, curves, etc
- ✓ …into pixels
  - in a raster image

Jim Blinn, C.G. pioneer.
One hobby: colleting algorithms
to rasterize circles

64

Rasterization-based HW-supported rendering

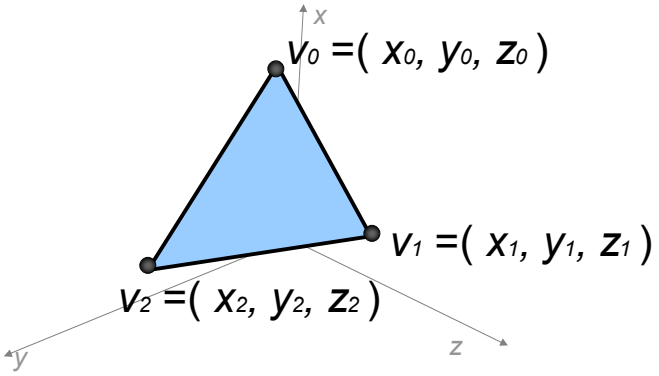
✓Anche detto
Transform and Lighting (**T&L**)



65

Rasterization-based rendering (HW supported)

✓ L'intera scena è composta da triangoli 3D



66

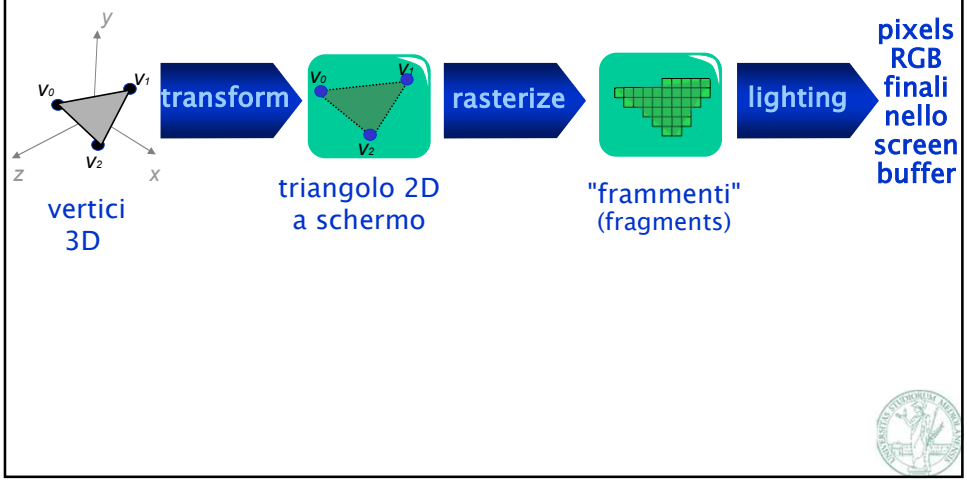
Anche detto T&L: Transform & Lighting

✓ *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

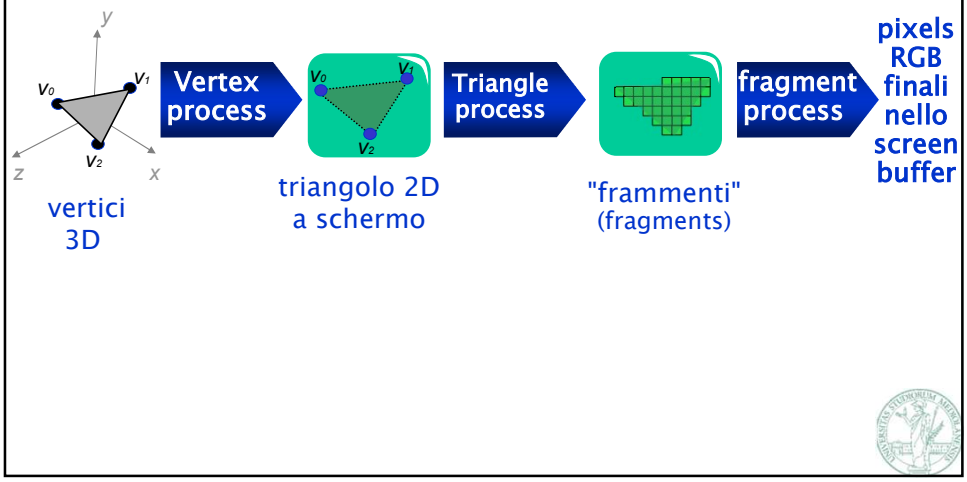
67

Rasterization-Based Rendering: il pipeline



68

Rasterization-Based Rendering: il pipeline



69

Rasterization-based rendering

- ✓ Input: insieme di vertici che formano triangoli
- ✓ L'algoritmo a pipeline (catena di montaggio) consiste in diverse fasi:

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)

71

Considerazioni generali sul Pipeline

- ✓ Ogni fase del pipeline avviene in parallelo
  ⇒Ogni vertice, triangolo, frammento può essere processato in contemporanea con ciascun'altro
- ✓ Le 3 fasi sono in cascata
- ✓ Il pipeline va tanto veloce quanto la sua fase più lenta
  ⇒Detta il collo di bottiglia
  ⇒Se il collo di bottiglia avviene per vertice, l'applicazione si dice «transform limited»
  ⇒Se avviene per frammento, l'applicazione si dice «fill limited»

72

THE GREAT DEBATE

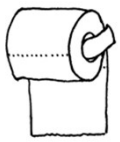
RASTERIZATION
VS
RAY-TRACING

73

Rendering Algorithms Paradigms

RAY-TRACING

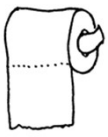
```
for each pixel:
   for each primitive
```



Like this?

RASTERIZATION

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



Or like this?

74

Primitive di rendering

Q: quali primitive di rendering usando rasterization?

A: qualunque cosa si sappia:

1) proiettare (da 3D a 2D)
2) «rasterizzare» (in 2D)

convertire in pixel

Quindi, allo stato attuale: per le GPU

1. PUNTI — per es, point splatting per point clouds
2. SEGMENTI
3. **TRIANGOLI** — Per es, per triangle mesh

Il caso principale! (di gran lunga). Le GPU sono ottimizzate per questo caso

E' il motivo principale della popolarità delle tri-mesh come prim

Q: quali primitive di rendering usando ray-tracing?

A: qualunque cosa si sappia:

1) intersecare con un raggio

efficacemente!

Quindi:

⇒ Triangoli? — Per es, per triangle mesh

Anche, ma anche primitive più complesse, come:

⇒ Implicit surfaces — Per es, per CSG
⇒ Height fields
⇒ Voxelized dataset — Il metodo principale per «direct volume rendering»
⇒ …

75

Vantaggi del ray-tracing

- ✓ E' una classe di algoritmi concettualmente semplice
- ✓ E' facile ottenere effetti visuali complessi (e realisitici) (incluso rifrazione, riflessioni, ombre…)
- ✓ Simula in modo abbastanza accurato la sintesi di un'immagine da parte di (ad esempio) una macchina fotografica (pur fra molte semplificazioni)
- ✓ E' possibile renderizzare direttamente qualsiasi «primitiva di rendering»: basta implementare la funzione di computo di intersezione con un raggio
- ✓ Parallelismo implicito:
  ogni pixel può essere implementato in parallelo
  (modello SIMD -- single instruction, multiple data)

76

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 su una buseness card :-P !
(by Paul Heckbert)

77

Vantaggi degli approcci basati su rasterizzazione

- ✓ Complessità lineare con numero di primitive
- ✓ Per ogni primitiva, si processano solo i pixel coinvolti – migliore scalabilità?
- ✓ E' l'algoritmo per il quale le GPU sono state pensate, dunque supporto HW garantito

78

Visione storica / tradizionale (il luogo comune)

- ✓Ray-tracing
  - ⇒Lento, ma accurato
  - ⇒Gli algoritmi standard per il rendering offline
  - ⇒Per esempio, usato nella movie industry
  - ⇒Alcuni software ray-tracers / path-tracers noti: POV-ray, renderman (pixar), YafaRay, Mitsuba
- ✓Rasterization
  - ⇒Veloce, ma approssimato
  - ⇒Gli algoritmi standard per il rendering online
  - ⇒Per esempio, usato nella game industry
  - ⇒Alcuni API basati su rasterization based: OpenGL, DirectX, Metal, Vulkan

79

Render farms

- ✓Implicit parallelism … reso esplicito

Pixar/Disney Render Farm

80

Il dibattito dura da decenni

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

82

I luoghi comuni

✓ Raytracing / path-tracing:

⇒ effetti visuali complessi → realismo

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

⇒ *quindi:* perfetto per rendering off-line / hi-quality!

✓ 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 e approssimato

84

La realtà: raytracing non è necessariamente lento

✓perché:

⇒È intrinsecamente parallelizzabile

- alto livello di **parallelismo implicito**
- quindi, implementabile con HW parallelo

⇒Le primitive possono essere forme complesse

- Questo riduce il numero di primitive necessarie a comporre una data virtuale

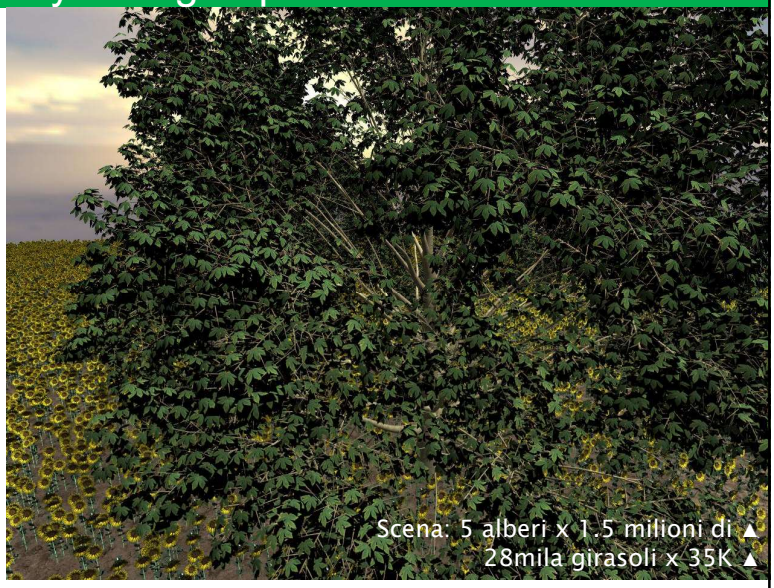
⇒Ottimizzazioni: usando apposite strutture dati, è possibile ridurre il numero di primitive da testare per ogni raggio

- Strutture di **indicizzazione spaziale**
- Nota: è più arduo per scene animate
- Le complessità degli algoritmi di Ray-Tracing può essere resa **sublineare** col numero di primitive

85

Real time raytracing: è possibile

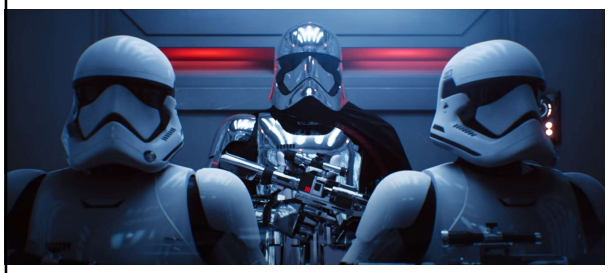
Un precursore → (su HW specializzato per questo caso)



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

86

Real time raytracing: è possibile



Unity
Real time Raytracing
(2019)

Unreal + Nvidia
Real-time Raytracing
(2019)

89

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

- ✓ Esistono molti algoritmi basati sul rasterization per simulare o approssimare:
  - ⇒ Ombre portate
  - ⇒ Diffrazioni
  - ⇒ Rifelssioni speculari
  - ⇒ Riflessioni multiple (illuminazione «globale»)
  - ⇒ Rifrazioni
- ✓ Si tratta di algoritmi specializzati per ciascuno di questi effetti

90

La realtà: rasterization based supporta effetti di luce compessi




91

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)

93