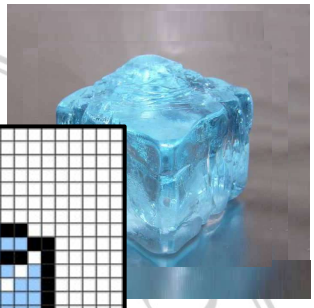
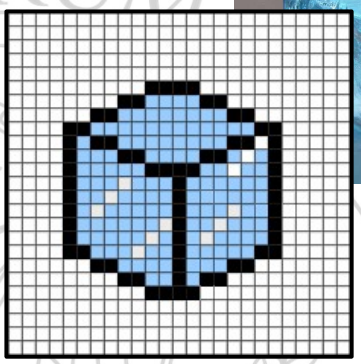
Marco Tarini - Computer Graphics 2025/2026
Università degli Studi di Milano

Rasterizing primitives

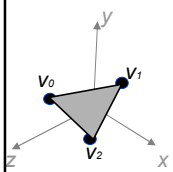


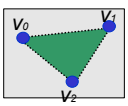


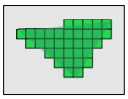
1

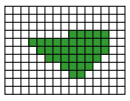
Rasterization based pipeline

Vertici (punti in R^3) → computazioni per vertice → Vertici proiettati (punti in R^2) → **RASTERIZ-ZAZIONE** → frammenti (candidati pixels) → computazioni per frammento → screen buffer









2

Rasterizzazione di tirangoli (o di qualsiasi altra primitiva)

- ✓ Individuare i frammenti che compongono una primitiva
  - ⇒ Uno per ogni pixel coperto dalla primitiva
  - ⇒ I frammenti prodotti vengono passata alla fase successiva (che determina il colore RGB del pixel)
- ✓ E' un procedimento del interamente 2D
- ✓ E' estremamente parallelizzabile
  - ⇒ Per sfruttare questo, si adotta un hardware parallelo
  - ⇒ Sulle GPU, è implementato in hardware (architettura specializzata per lo scopo)
  - ⇒ E' una fase dell'hardware molto efficiente e poco flessibile (non è «programmabile» dall'utente). E' «hard-wired» in pratica: fa sempre la stessa cosa,
  - ⇒ GPU diverse possono implementare algoritmi diversi

3

Rasterizzazione di tirangoli (o di qualsiasi altra primitiva)

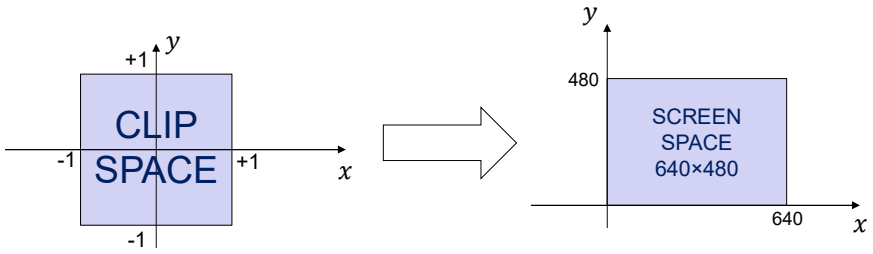
- ✓ I vertici sono passati al rasterizzatore in coordinate clip omogenee
- ✓ Per prima cosa, vengono convertite in coordinate schermo cartesiane
  - ⇒ come sappiamo già
  - ⇒ è uno spazio in cui i pixel hanno coordinate intere
- ✓ Il componente rasterizzatore usa solo le x e la y in spazio schermo (cioè in coordinate pixel),
  - ⇒ la z (cioè la *depth* del pixel) viene ignorata in questa fase
- ✓ Le coordinate in spazio schermo dei vertici
  - ⇒ non sono (se non per caso) intere
  - ⇒ non sono necessariamente dentro al viewport
  - ⇒ (tuttavia, devono solo essere prodotti frammenti appartenenti al viewport)

4

Da Clip Space a Screen Space (o "Viewport")

- ✓ Spazio Clip 2D: [-1 , +1] × [-1 , +1] (la z viene ignorata)
- ✓ Spazio Screen: [0 , resX-1] × [0, resY-1]
  - ⇒ Coordinate schermo (screen)
    o coordinate pixel
    o coordinate viewport

il rettangolo di schermo che contiene il rendering (nelle applicazioni non a schermo intero)



- ✓ In coordinate screen, i pixel (e i frammenti) hanno coordinate intere!

5

Da Clip Space a Screen Space (o Viewport)

$$f_{VIEWPORT}\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (x+1)/2 \cdot RES_X \\ (y+1)/2 \cdot RES_Y \end{pmatrix}$$

in $[-1,+1] \times [-1,+1]$

in $[0,1] \times [0,1]$

(nota: sono spazi 2D)

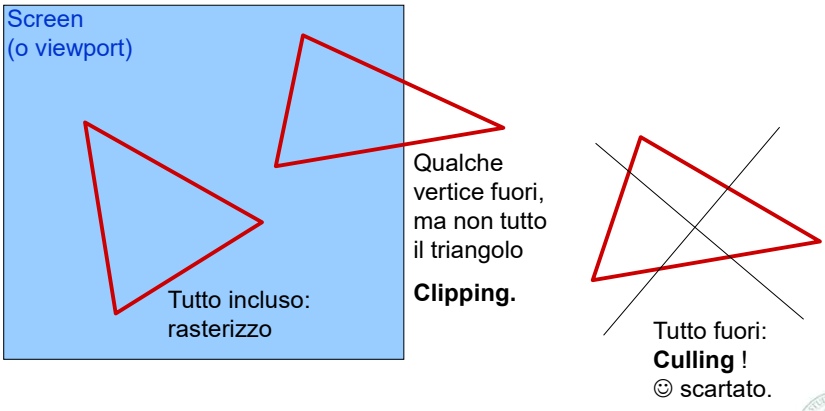
6

Algoritmo di rasterizzazione di triangoli

- ✓ Vanno individuati i frammenti che compongono i triangoli
  - ⇒ *Input:* tre punti 2D (le posizioni x,y dei vertici in screen space)
  - ⇒ *Output:* i frammenti interni al triangolo
- ✓ Un frammento per ogni pixel dello screen buffer interno al triangolo
  - ⇒ Ogni frammento prodotto ha coordinate schermo intere
- ✓ Devono essere prodotti
  tutti e soli i frammenti le cui coordinate
  cascano all'interno del triangolo 2D
- ✓ Nota:
  i tre vertici di input hanno coordiante (in generale) non intere
  - ⇒ Sono le coordiante x e y risultanti dalle trasformazioni spaziali

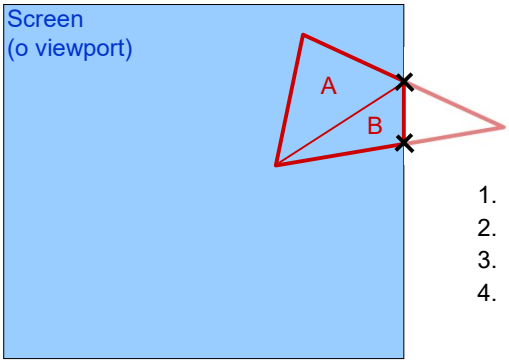
7

Clipping e culling



8

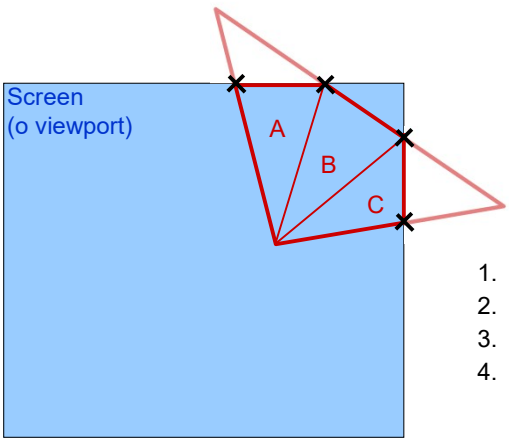
Clipping: la vecchia scuola



1. Trovo intersezioni
2. Unisco intersezioni
3. Divido poligono in triangoli
4. Rasterizzo ogni triangolo
   A e B

9

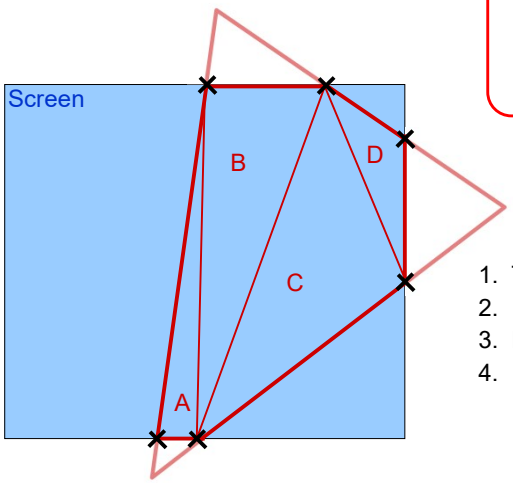
Clipping: la vecchia scuola



1. Trovo intersezioni
2. Unisco intersezioni
3. Divido poligono in triangoli
4. Rasterizzo ogni triangolo
   A, B, e C

10

Clipping: la vecchia scuola



Caso pessimo molto complicato

Non adatto ad
una implementazione HW

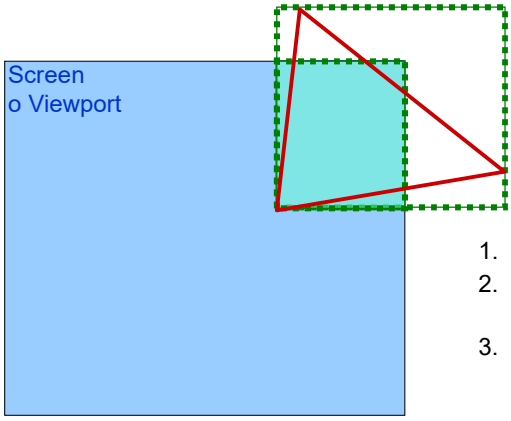
L'HW deve prevedere il
caso pessimo, anche se è raro

1. Trovo intersezioni
2. Unisco intersezioni
3. Divido poligono in triangoli
4. Rasterizzo ogni triangolo
   A,B,C,D

11

Clipping: versione più adatta ad una implementazione HW

✓Clipping



Come si interseca
un bounding box
con lo schermo
(cioe' col rettangolo
definito dal ViewPort)?

1. Trovo bounding box
2. Interseco bounding box
   con schermo (o viewport)
3. Rasterizzo nel bounding box
   come normale

12

Algoritmo di rasterizzazione di triangoli

✓ Il rasterizzatore si occupa anche di INTERPOLARE GLI ATTRIBUTI in ogni frammento prodotto

⇒ *Input ulteriore:* un set di attributi per ogni vertice (qualsiasi insieme di vettori, scalari…)

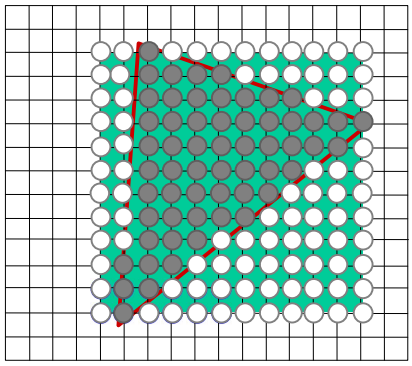
⇒ *Output ulteriore:* un set di valori interpolati, per ogni frammento prodotto

⇒ come sappiamo, l'output è dato da l'iterpolazione degli input avente come pesi le coordinate baricentriche del frammento nel triangolo renderizzato

⇒ Gli attributi interpolati sono passati dal rasterizzatore al processing per frammento

13

Esempio di algoritmo per rastizzazione di triangoli (parallelizzabile!)

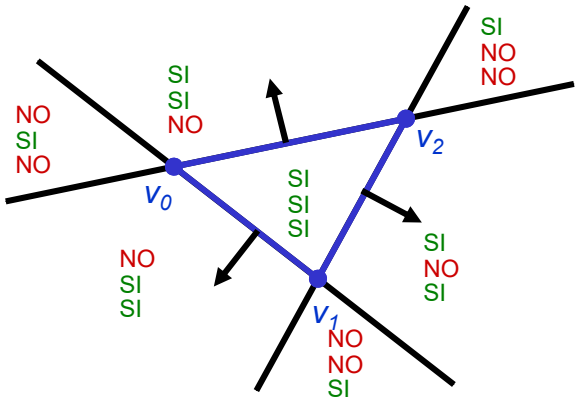


1. Trovo un rettangolo (di coordianate intere) che contiene il triangolo detto "bounding box" o "bounding rectangle"
2. Processo tutti le posizioni interne (nota: questo è parallelizzabile)
3. Per ogni posizione interna: se è dentro al triangolo, allora produco un frammento

14

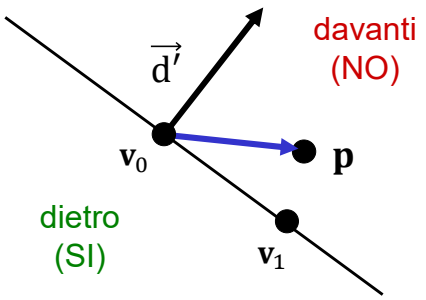
Test di appartenenza ad un triangolo

- ✓ Triangolo 2D = interesezione di 3 semipiani
- ✓ Un punto 2D è interno al triangolo 2D *sse* appartiene a tutti e tre i semipiani



15

Test di appartenenza ad un semipiano (ci serve solo in 2D)



Da quale parte della retta passante per $\mathbf{v}_0$ e $\mathbf{v}_1$ si trova il punto $\mathbf{p}$?

Soluzione:

$$\vec{d} = (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_0) = \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \end{pmatrix}$$

$$\vec{d}' = \begin{pmatrix} -d_y \\ d_x \end{pmatrix}$$

il vettore $\vec{d}'$ è $\vec{d}$ ruotato di 90°

la cosiddetta *Edge function* dell'edge da $\mathbf{v}_0$ a $\mathbf{v}_1$

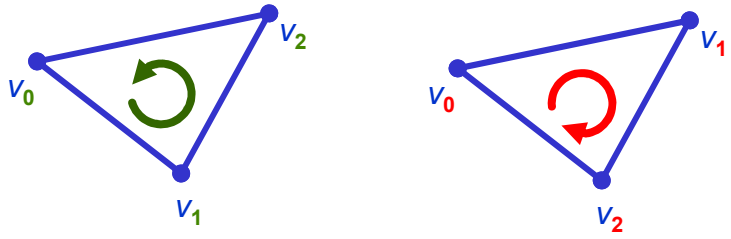
Basta verificare se:

$$(\mathbf{p} - \mathbf{v}_0) \bullet \vec{d}' < 0$$

16

Domande avanzate

1. Cosa succede a questo algoritmo se l'orientamento del triangolo è in verso opposto? Come puoi riconoscere i frammenti interni al tri in entrambi i casi?



2. Date le coordinate 2D di $v_1\ v_2\ v_3$ sapresti calcolare le coordinate baricentriche del frammento in posizione **p**? (sono necessarie per interpolare gli attributi)

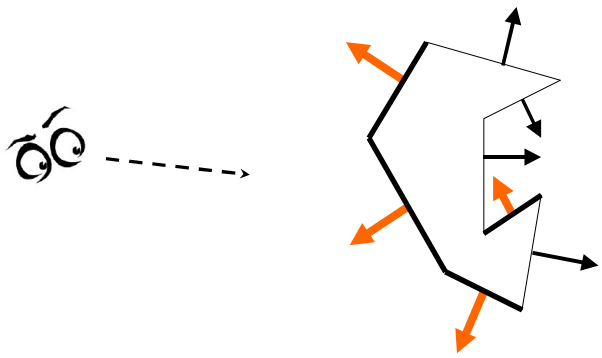
17

Nel caso di mesh chiuse e ben orientate: Backface Culling

✓ Concetto:

⇒se una superficie **chiusa** e **opaca**…

→ non vedrò mai l'interno!

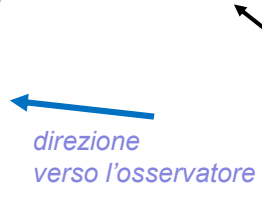


18

Back-face culling: un'utile ottimizzazione

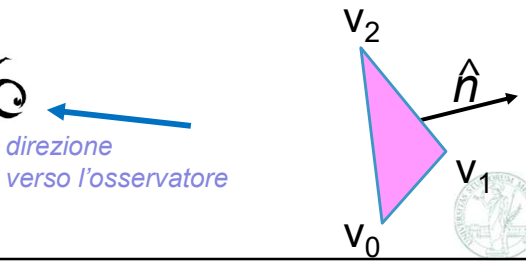
✓ Traingolo *front-facing*

⇒"visto da davanti"



✓ Traingolo *back-facing*

⇒"visto di spalle"



19

Backface Culling

✓ **Back-face Culling**

⇒ "to cull" = scartare.
To cull a face = scartare la primitiva in fase di rendering

✓ Idea:

⇒ ipotesi: mesh **ben orientata** e **chiusa**,

⇒ ipotesi: POV esterno alla superficie

⇒ ipotesi: materiale opaco (nel senso di non trasparente)

⇒ conseguenze:

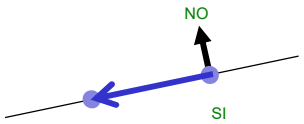
→ non vedrò mai l'interno!

→ qualunque faccia si veda "da dietro" (un **back-facing triangle**) finirà per forza *occlusa* alla vista da (almeno) una faccia "vista da davanti" (un **front-facing triangle**)

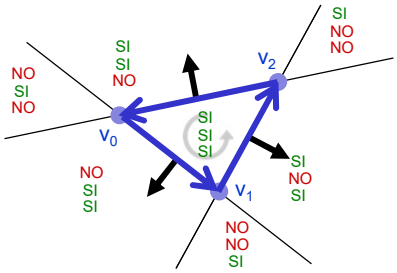
→ posso allora scartare (to «cull») tutti i triangoli che sono back-facing, (sapendo che saranno automaticamente occlusi)

20

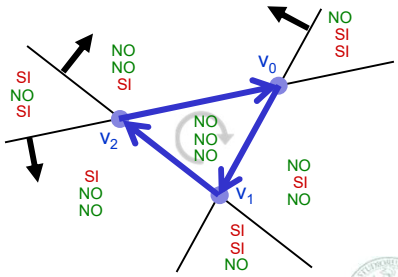
Test di appartenenza di frammento a un triangolo in senso orario e antiorario



SCREEN SPACE:



v0 v1 v2 in senso antiorario

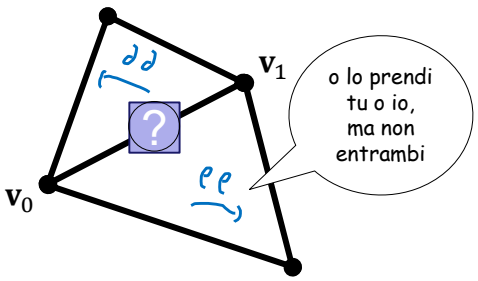


v0 v1 v2 in senso orario

21

Dettaglio: cosa succede se il frammento è "proprio sulla linea"? (cioè se la edge function fa proprio 0)

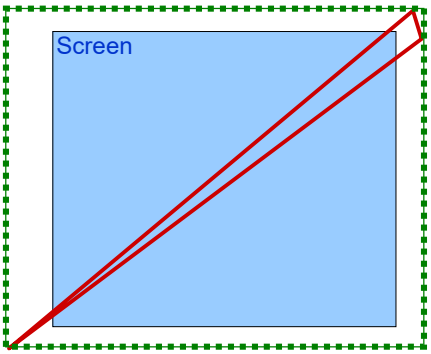
- ✓ Molte soluzioni sono possibili, ma una regola deve sempre valere (è compito dell'implementazione hardware farla valere):
- ✓ un frammento su una linea "a cavallo" fra due triangoli deve essere rasterizzato da *esattamente* uno dei due
  - ⇒ Non entrambi: perché vanno evitati gli "overdraw" inutili
  - ⇒ Non nessuno dei due: perché vanno evitati i gap (buchi) fra i i due



- ✓ Cioè: se il frammento è scartato dell'edge "da $\mathbf{v}_0$ a $\mathbf{v}_1$" allora NON deve essere scartato testando l'edge in senso opposto "da $\mathbf{v}_1$ a $\mathbf{v}_0$", e viceversa

24

Un caso molto sfavorevole



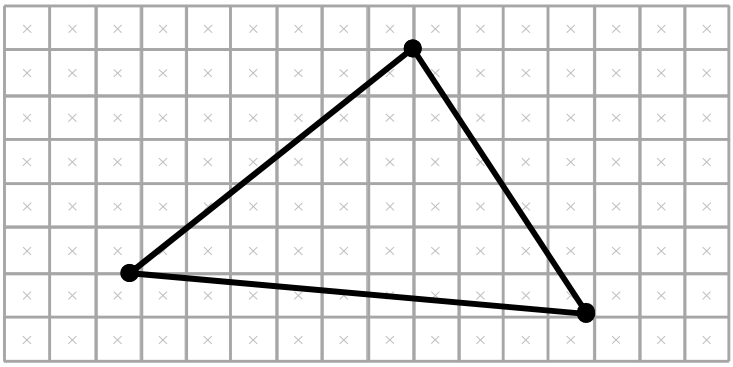
Per questo motive
(e molti altri)
i triangoli lunghi e stretti
non sono ideali

Triangoli:
- lunghi e stretti
- orientati lungo la direzione diagonale dello schermo (in spazio clip)

necessino il testing di *ogni* triangolo sullo schermo

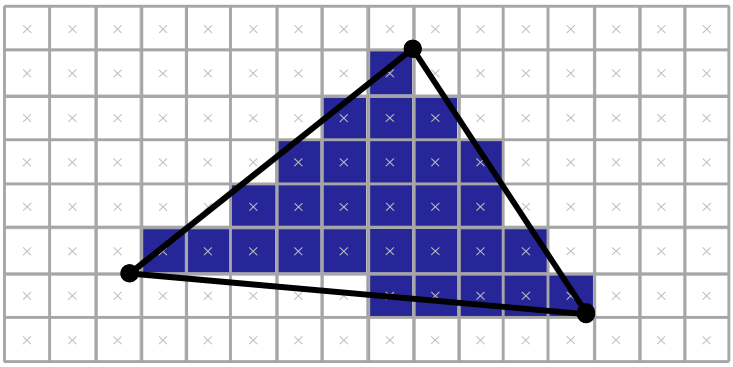
28

Rasterizzare Triangoli



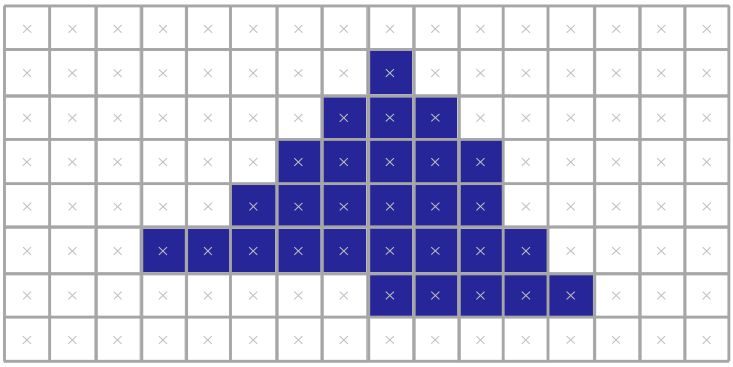
29

Rasterizzare Triangoli



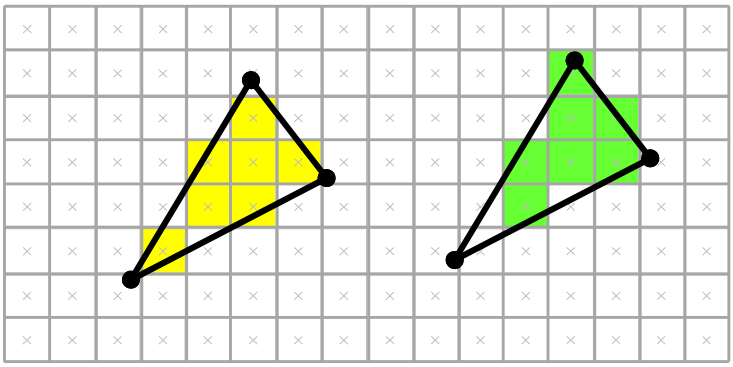
30

Rasterizzare Triangoli



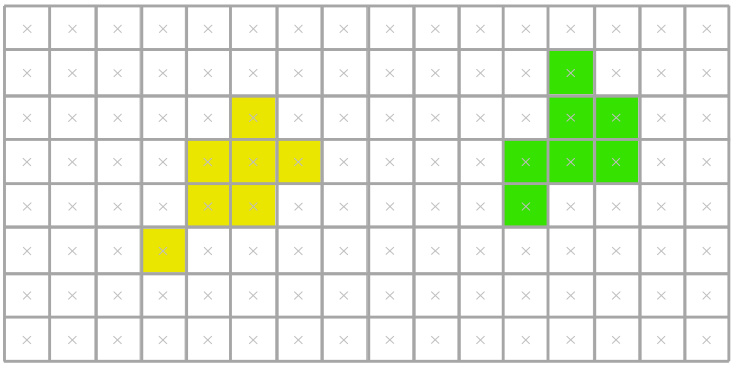
31

Rasterizzare Triangoli



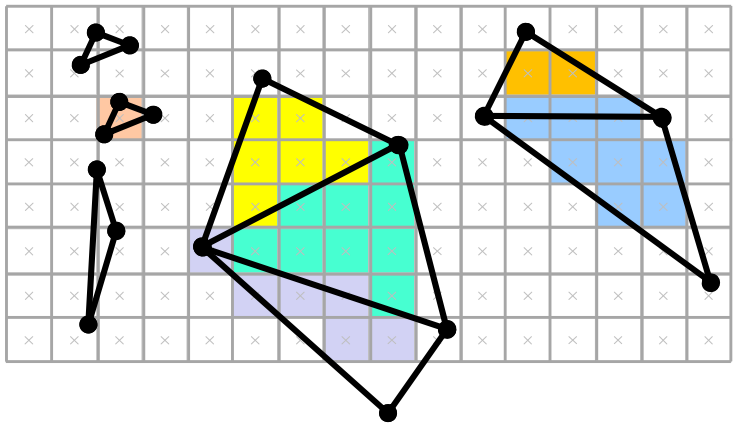
35

Rasterizzare Triangoli



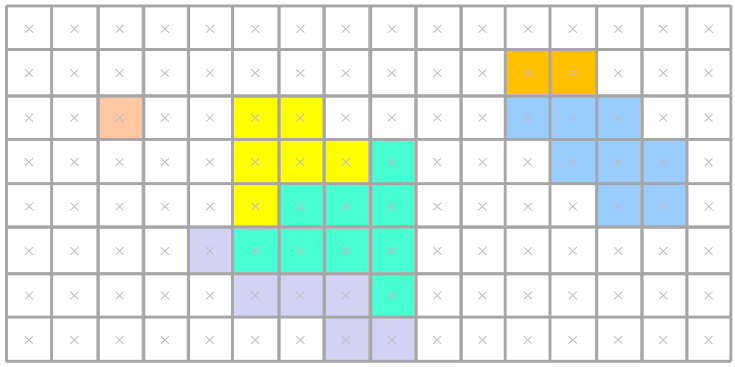
36

Rasterizzare Triangoli



46

Rasterizzare Triangoli



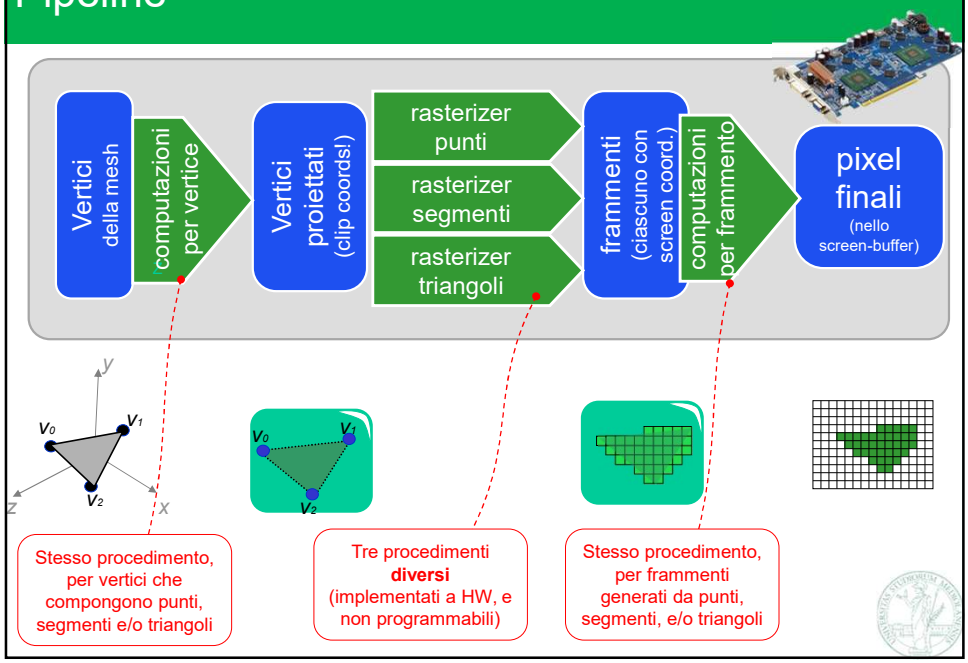
47

Note: rasterizzazione triangoli

- ✓ Triangoli della stessa forma ma posizioni diverse possono generare insieme di frammenti diversi
- ✓ Un triangolo può generare qualsiasi numero di frammenti
  - ⇒ anche nessuno!
  - ⇒ anche tutti quelli sullo schermo
- ✓ Se un triangolo è parzialmente fuori al viewport, vengono generati solo i frammenti interni al viewport («clipping»)

48

Pipeline



50

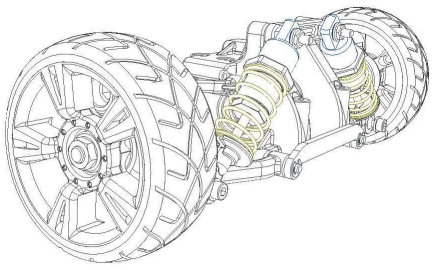
Rasterizzazione di altre primitive

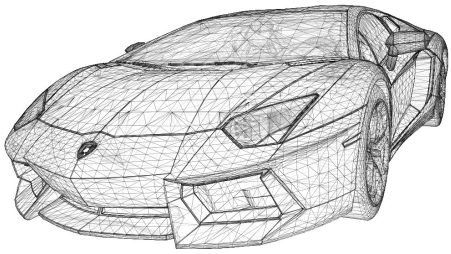
- ✓ Gli hardware GPU attuali sono pesati per rasterizzare solo tre tipi di primitive:
  - ⇒ Triangoli 2D – 3 vertici
  - ⇒ Segmenti 1D («linee») – 2 vertici
  - ⇒ Punti 0D («point splats») – 1 vertice
- ✓ Ovviamente, il primo caso è particolarmente utile ed ottimizzato
- ✓ La fase precente (per vertice) e successiva (per frammento) prescinde dal tipo di primitiva
  - ⇒ I vertici sono trasformati nello stesso modo, indipendentemente da che siano usati per definire punti, linee, o triangoli
  - ⇒ Il frammenti sono trattati nello stesso modo, indipendentemente da che siano stati generati rasterizzando punti, linee, o triangoli

51

Rasterizzare Linee

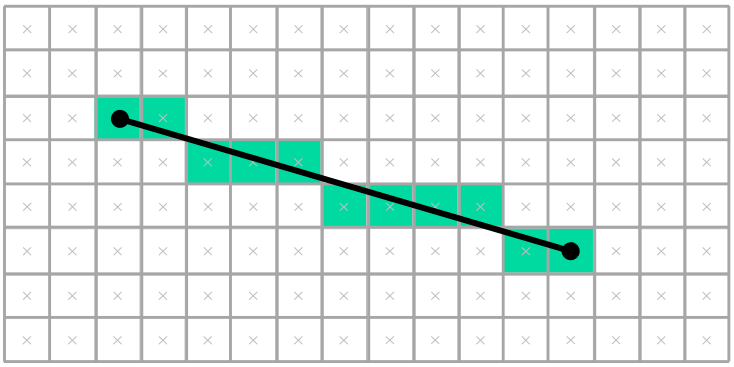
- ✓ La rasterizzazione delle linee è usata nella modalità di rendering detta *wireframe* (o «hidden lines»)





52

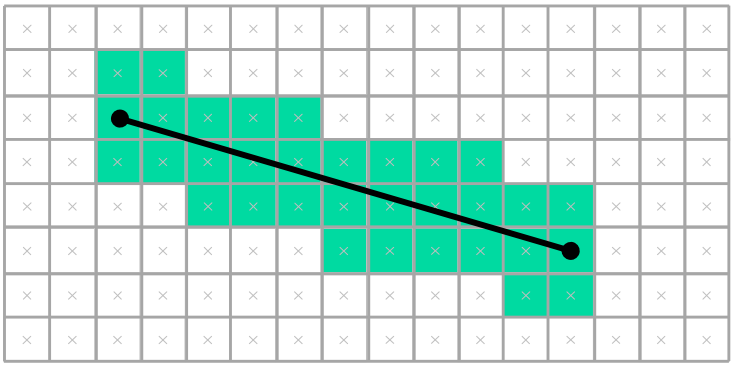
Rasterizzare Linee



Bresenham's line algorithm (1962)

54

Rasterizzare Linee (a spessori diversi)



Bresenham's line algorithm (1962)

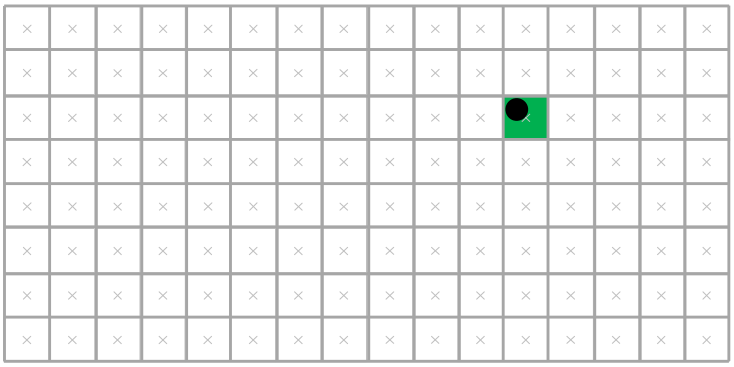
55

Nota storica: Bresenham's line algorithm

- ✓ Un algoritmo iterativo per rasterizzare line
- ✓ Vantaggi:
  - ⇒ Richiede solo computazioni fra interi (no virgola mobile)
  - ⇒ Efficienza
- ✓ Svantaggi:
  - ⇒ intrinsecamente sequenziale (difficilmente parallelizzabile)
  - ⇒ ogni iterazione dipende dalla precedente ☹
- ✓ Molto usato in passato, non più oggi (almeno, non nelle GPU)

56

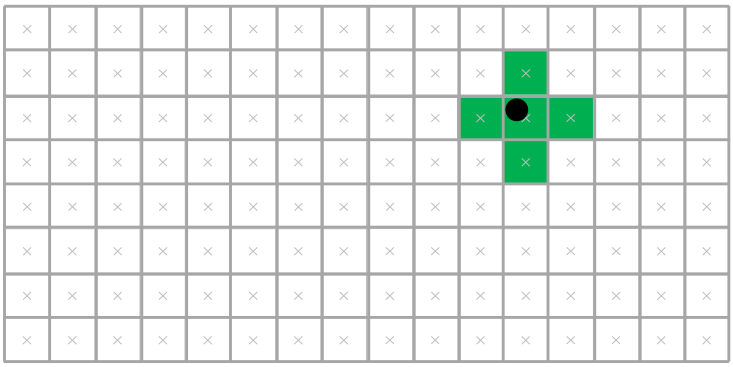
Rasterizzare punti



Point “splat”

58

Rasterizzare punti



Point “splat”
di dimensione maggiore

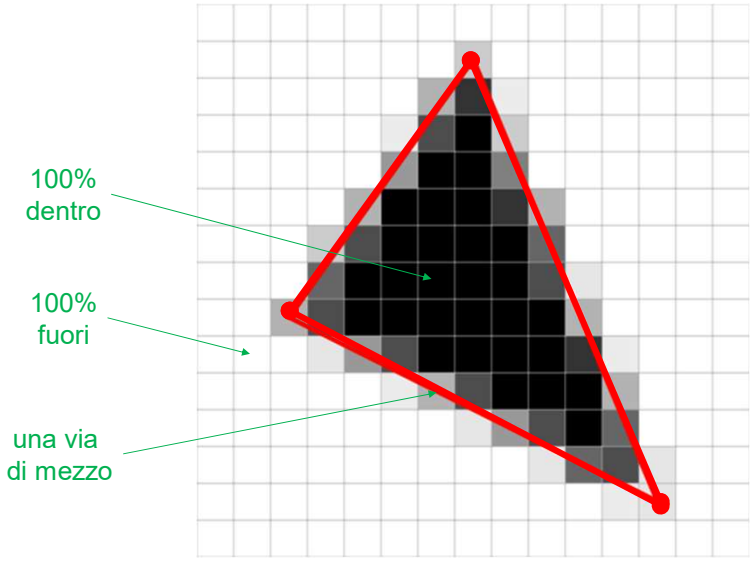
59

Antialiasing

- ✓ Negli esempi visti, il rasterizzatore produce o scarta frammenti “o tutto o niente”
- ✓ L’antialiasing (a volte riferito con la sigla AA) è il nome di un insieme di tecniche per nascondere il difetto di scalettatura indotto dai pixel (aliasing)
- ✓ Esistono degli algoritmi di rasterizzazione che producono frammenti «parziali», cioè semitrasparenti, sui bordi delle primitive

60

Antialiasing: nel rasterizzare triangoli

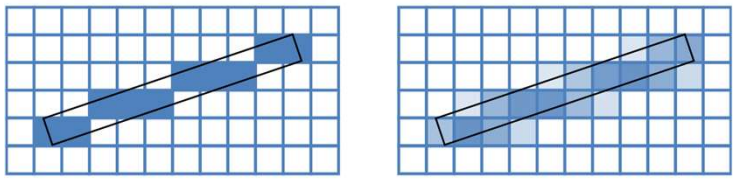


61

Antialiasing: nel rasterizzare segmenti

Senza:

Con:



62