



Virtualna okruženja

Igor S. Pandžić, Tomislav Pejša

Tehnike ubrzavanja iscrtavanja

Kako iscrtavati brže?



- ♦ Mjera brzine iscrtavanja – broj slika u sekundi (engl. frames per second, FPS)
- ♦ Za interaktivnu 3D grafiku – min. 20-30 FPS
- ♦ (Za brze akcijske igre poželjno i do 60 FPS)
- ♦ Tehnologija grafičkog sklopovlja napreduje strahovito brzo – no, sklopovlje nikad neće biti „dovoljno brzo“
- ♦ Npr. model Boeing 777 – 500.000.000 trokuta
- ♦ Moderan GPU (GeForce GTX 580) iscrtavao bi ga brzinom od tek 4 FPS!

Napredak tehnologije



- ♦ Napredak tehnologije nije rješenje – potrebne bolje metode ubrzavanja iscrtavanja
- ♦ Obradit ćemo metode:
 - Optimalan zapis poligona
 - Selektivno odbacivanje poligona
 - Tehnike razina detalja
 - Optimizacija protočnog sustava

Optimalan zapis poligona



- ♦ Naivan pristup – u protočni sustav šaljemo svaki trokut zasebno (3 vrha po trokutu)
- ♦ Mnogi vrhovi su dijeljeni među susjednim trokutima te se obrađuju višekратно – neučinkovito!
- ♦ Možemo smanjiti broj vrhova organizacijom trokuta u spoјenu strukturu:
 - Trake trokuta
 - Lepeze trokuta
 - Mreže trokuta

Trake trokuta (triangle strip) (1/2)

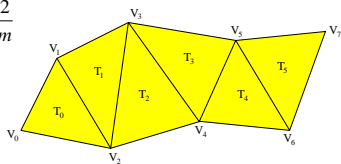


- ♦ 1. trokut zadan s 3 vrha
- ♦ Idući nasljeđuje 2 vrha prethodnog
- ♦ $V_0, V_1, V_2, V_3, \dots$
- ♦ Prosječan broj vrhova po trokutu ($m - \#$ trokuta):

$$\bar{v} = \frac{3 + (m-1)}{m} = 1 + \frac{2}{m}$$

$$m \rightarrow \infty \Rightarrow \bar{v} \rightarrow 1$$

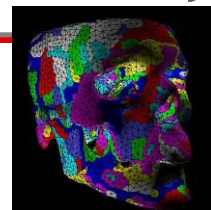
$$m = 10 \Rightarrow \bar{v} = 1.2$$



Trake trokuta (2/2)

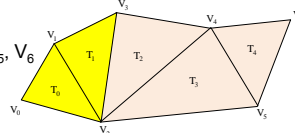


- ♦ Nije učinkovito u g.p.s. slati svaku traku vrhova zasebno (pozivi iscrtavanja su skupi)
- ♦ Možemo spojiti više traka u jednu, obrtanjem redoslijeda 2 zadnja vrha



- ♦ Primjer:

- $V_0, V_1, V_2, V_3, V_2, V_4, V_5, V_6$



Selektivno odbacivanje poligona (culling)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Osnovna ideja: poligone koji nisu u nekom trenutku vidljivi na slici ne trebamo iscrtavati
- ♦ Najvažnije metode:
 - Odbacivanje stražnjih poligona (backface culling)
 - Odbacivanje po projekcionom volumenu (view-frustum culling)
 - Portalno odbacivanje (portal culling)
 - Odbacivanje prekrivenih poligona (occlusion culling)

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

13

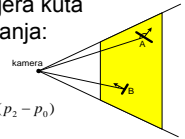
Odbacivanje stražnjih poligona



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Standardni dio geometrijske faze g.p.s.
- ♦ Poligoni okrenuti od kamere nisu vidljivi
- ♦ Okrenutost poligona određena redoslijedom njihovih vrhova (2 konvencije – u smjeru kazaljke na satu ili obrnuto)
- ♦ Moguća implementacija – provjera kuta normale poligona i smjera gledanja:

$$n = (p_1 - p_0) \times (p_2 - p_0)$$



01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

14

Odbacivanje po projekcionom volumenu



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Sve što je izvan projekcionog volumena, nevidljivo je
- ♦ Za provjeru vidljivosti koriste se hijerarhije obujmice, BSP i oktalna stabla...
- ♦ Npr. hijerarhija obujmice:
 1. Ako je obujmica potpuno izvan projekcionog volumena, odbacuje se sve u njoj
 2. Ako je potpuno unutra, sve se crta
 3. Ako projekcioni volumen siječe obujmicu, provjerava se sljedeća niža hijerarhijska razina obujmice
- ♦ Izvodi se u aplikacijskoj fazi

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

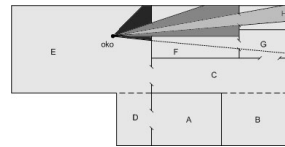
15

Portalno odbacivanje (1/2)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Koristi se za scene arhitekture sa sobama
- ♦ Scena se dijeli na ćelije (sobe)
- ♦ Ćelije imaju portale (vrata) prema drugim ćelijama
- ♦ Za svaku ćeliju gradimo graf susjednosti (podaci o portalima i susjednim ćelijama)



01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

16

Portalno odbacivanje (2/2)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Iscrtavanje je rekurzivno:
 1. Iscrtaj trenutnu ćeliju (uz korištenje trenutnog projekcionog volumena)
 2. Na temelju vidljivih portala odredi nove, sužene projekcione volumene
 3. Iscrtaj vidljive susjedne ćelije
- ♦ Izvodi se u aplikacijskoj fazi

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

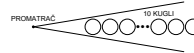
17

Odbacivanje putem prekrivenosti



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Predmeti često prekriveni drugim predmetima
- ♦ Neće se vidjeti zbog Z-spremnika, no Z-spremnik se primjenjuje tek u fazi rasterizacije
- ♦ Dubinska složenost:



DUBINSKA SLOŽENOST



KONAČNA SLIKA - VIDI SE SAMO PRVA KUGLA

- ♦ Ideja: prekrivenu geometriju odbaciti što ranije
- ♦ Dosta složene tehnike, no neke su podržane sklopovski
- ♦ Učinak ovisi o redoslijedu iscrtavanja – najbolje od naprijed prema natrag (front-to-back)

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

18

Sklopovska provjera prekrivenosti (hardware occlusion queries)



Zavod za telekomunikacije

- GPU podržava način iscrtavanja u kojem se provjerava vidljivost skupa poligona (najčešće obujmica) s obzirom na Z-spremnik
- Algoritam:
 - Iscrtati obujmicu u načinu provjere prekrivenosti (uključen Z-test, isključen Z-write)
 - Dohvatiti broj vidljivih piksela – ako je veći od nekog praga, iscrtati predmet (uz uključen Z-write)
- Najbolje u redosljedu front-to-back, uz korištenje hijerarhije obujmica
- Izvodi se u aplikacijskoj fazi (uz djelomičnu sklopovsku podršku)

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

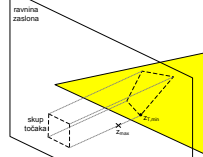
19

Z-odbacivanje (Z-cull)



Zavod za telekomunikacije

- Ugrađeno u fazi prolaza trokuta
- Rasterizacija se radi u skupovima do 8x8 točaka
- Ispituje se li prekriven isječak trokuta (koji odgovara trenutnom skupu)
- Postupak Z_{MAX} :
 - Odredi $z_{T,MIN}$
 - Dohvati z_{MAX} iz Z-spremnika
 - Ako $z_{T,MIN} > z_{MAX}$, isječak je prekriven



01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

20

Rani-Z (early-Z)



Zavod za telekomunikacije

- Nakon generiranja fragmenata, a prije sjenčanja
- Uspoređuje dubinu fragmenta z_F s dubinom u Z-spremniku – ako je veća, odbacuje fragment
- Metode Z-cull i early-Z:
 - Ugrađene u graf. sklopovlje i uključene „po defaultu”
 - Smanjuju opterećenje procesora točaka
 - Posebno učinkovite kod višeprolaznog iscrtavanja (jer se Z-spremnik postavlja u 1. prolazu)
 - Automatski se isključuju ako pixel shader mijenja dubinu fragmenta z_F

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

21

Tehnike razina detalja



Zavod za telekomunikacije

- Engl. Level Of Detail - LOD
- Ideja: smanjiti razinu detalja (broj poligona) kada je predmet udaljen od kamere
 - Razlika se neće primijetiti
- Ako brzina padne, smanji razinu detalja
- Podtehnike:
 - Generiranje – stvaranje jednostavnijih inačica osnovnog modela predmeta
 - Odabir – odluka koja verzija će se iscrtavati
 - Zamjena – zamjena trenutne inačice drugom

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

22

Pojednostavljanje mreže trokuta



Zavod za telekomunikacije

- Smanjiti broj trokuta u modelu, nastojeći pritom što manje promijeniti izgled modela
- Osim za LOD, koristi se i za pojednostavljivanje vrlo složenih modela, npr. dobivenih skeniranjem
- Eliminacija vrhova (starija metoda)



01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

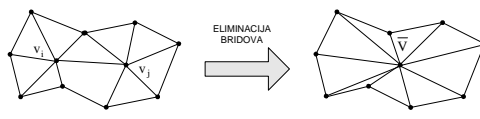
23

Eliminacija bridova (edge collapse)



Zavod za telekomunikacije

- Novija i jednostavnija metoda
- Općeniti postupak:
 - Izračunaj funkciju troška za sve moguće eliminacije bridova; poredaj ih po trošku
 - Izvedi operaciju s najmanjim troškom
 - Ponovo izračunaj trošak gdje se mijenja; ponovi 2



01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

24

Odabir razina detalja



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Kako odabrati LOD razinu koja će se u nekom trenutku iscrtavati?
- ♦ U upotrebi 2 metrike:
 - Udaljenost predmeta od kamere
 - Površina projekcije obujmice

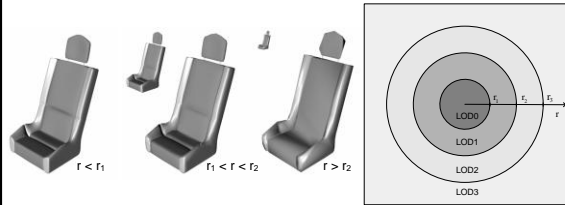
01/03 VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša 25

Udaljenost predmeta od kamere



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Najjednostavnija i najčešće korištena metoda
- ♦ Svaka razina LOD_i ima raspon udaljenosti od kamere r_i do r_{i+1} na kojoj je aktivna



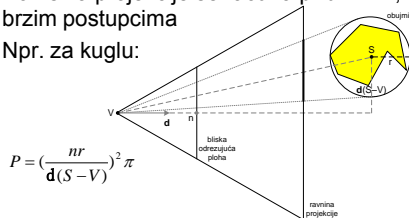
01/03 VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša 26

Površina projekcije obujmice



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Kao i za udaljenost od kamere, definiraju se rasponi površina P_i do P_{i+1}
- ♦ Površina projekcije se računa približnim, ali brzim postupcima
- ♦ Npr. za kuglu:



01/03 VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša 27

Zamjena razina detalja



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Mora biti što neprimjetnije
- ♦ Nagla zamjena modela rezultira efektom skokova (popping)
- ♦ Glavne metode:
 - Diskretne razine detalja
 - Miješanje razina detalja
 - α razine detalja
 - Geomorfne razine detalja

01/03 VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša 28

Diskretne razine detalja (1/2)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Koristi se više verzija istog modela, sa sve manjim i manjim brojem poligona
- ♦ Kad se ispune uvjeti (npr. udaljenost od kamere), jedna inačica se zamjenjuje drugom



01/03 VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša 29

Diskretne razine detalja (2/2)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Jednostavna tehnika
- ♦ Vrlo dobra sklopovska podrška – različite LOD inačice modela mogu se pohraniti zajedno u video mem.
- ♦ Izražen efekt skokova, pogotovo ako r „oscilira” oko granice raspona
- ♦ Potonje moguće ublažiti histerezom – granice promjene u jednom smjeru drukčija nego u drugom

01/03 VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša 30

Miješanje razina detalja



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Ideja: kratko vrijeme iscrtavamo obje inačice istodobno, uz uključen alpha blending
- ♦ Postupak:
 1. Iscrtaj LOD1 bez prozirnost u spremnik boje, uz uključen Z-spremnik
 2. Iscrtaj LOD2 u spremnik boje uz uključenu „over“ funkciju prozirnosti
 - Pritom linearno povećavati α od 0 do 1
 3. Kad je LOD2 iscrtan uz $\alpha = 1$, počni iscrtavati LOD1, uz uključen Z-test, ali isključen Z-write
 - Pritom linearno smanjivati α od 1 do 0
- ♦ Nedostatak – kratkotrajan gubitak performansi zbog istodobnog iscrtavanja 2 inačica predmeta

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

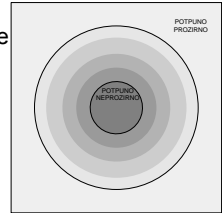
31

α -razine detalja



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Predmet postaje prozirniji do nestajanja
- ♦ Nije potrebno raditi dodatne LOD inačice
- ♦ Jednostavna metoda
- ♦ Eliminira efekt skokova
- ♦ Ubrzanje se postiže tek po nestajanju predmeta



01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

32

Geomorfne razine detalja



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Koristi se niz modela proizveden eliminacijom bridova
- ♦ Podjela vrhova – inverz eliminacije bridova
- ♦ Možemo zamisliti da je složenija LOD inačica nastala nizom podjela vrhova u jednostavnijoj inačici
- ♦ Ideja: za svaki vrh upamtimo njegov „vrh-roditelj“, te interpoliramo vrhove između susjednih LOD inačica
- ♦ Gladak prijelaz između dviju inačica modela
- ♦ Predmet neprestano mijenja oblik, što može zasmetati

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

33

Srodne tehnike



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Ideja LOD – zamijeniti resurs (model) jednostavnijom inačicom / aproksimacijom ovisno o relativnom položaju kamere
- ♦ To se može poopćiti na druge tehnike iscrtavanja
- ♦ Npr. zamjena materijala/tekstura niže kvalitetnima:
 - Isključivanje teksture detalja
 - Isključivanje teksture okoline
 - Zamjena shadera jednostavnijom inačicom
 - ...

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

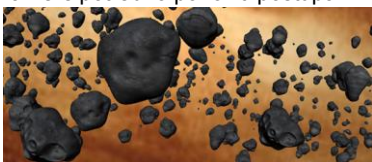
34

Varalice (impostors)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Složeni predmet iscrtamo u teksturu
- ♦ Predmet zamijenimo panoom (billboard), i na njega nalijepimo teksturu
- ♦ Kod većih promjena relativnog položaja kamere potrebno ponoviti postupak



01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

35

Oblaci panoa (billboard clouds)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Složeni predmet zamjenjujemo skupom panoa
- ♦ Svaki pano sadrži sliku nekog dijela predmeta
- ♦ Nije potrebno višekratno iscrtavati predmet



01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

36

Optimizacija protočnog sustava



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Najsporija faza stvara usko grlo (kao kod pokretne trake)
- ♦ Postupak
 1. Pronaći usko grlo
 2. Ubrzati tu fazu
 3. Ponoviti postupak
- Ako ne možemo ukloniti usko grlo, u ostalim fazama se može obaviti više posla i povećati kvaliteta

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscravanja • Pandžić, Pejša

37

Mjerenje performansi (1/2)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Brzina iscravanja – broj slika u sekundi (frames per second, FPS)
- ♦ Brzina geom. faze – broj vrhova u sekundi
- ♦ Brzina rast. faze – broj točaka u sekundi
- ♦ Te mjere nisu same dovoljne:
 - Usko grlo se često seli već unutar jedne slike
- ♦ Složeni testovi (benchmark):
 - Prethodno isključiti dvostruko spremanje

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscravanja • Pandžić, Pejša

38

Mjerenje performansi (2/2)



- ♦ Alati za profiliranje korištenja CPU/GPU:

- NVIDIA PerfKit
- AMD GPU PerfStudio
- PIX for Windows
- gDEBbugger

- ♦ Omogućuju vremensko praćenje raznih statistika:

- Broj poziva iscravanja, čitanja tekstura, izvođenja shadera
- Potrošnja memorije
- Iskorištenost CPU-a



01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscravanja • Pandžić, Pejša

39

Traženje uskog grla (1/3)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Testirati svaku fazu posebno
- ♦ Aplikacijska faza:
 - 100% na CPU
 - Koristiti programe za prikaz tereta procesora:
 - Ako je procesor skoro 100% opterećen, tu smo!
 - ... osim ako glavna petlja nije radno čekanje
 - Koristiti alate za profiliranje koda:
 - AMD CodeAnalyst, VS Team System Profiler...
 - Eliminirati ostale faze slanjem „praznih“ naredbi
 - Npr. za iscravanje koristiti null driver
 - Ako nema ubrzanja, našli smo krivca!

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscravanja • Pandžić, Pejša

40

Traženje uskog grla (2/3)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Geometrijska faza:
 - Najčešće 100% na GPU
 - Glavne operacije – dohvat i sjenčanje vrhova
 - Testiranje dohvata vrhova:
 - Povećati format vrha (npr. dodati „prazne“ teksturne koord.)
 - Ako brzina padne, bingo!
 - Testiranje sjenčanja vrhova:
 - Dodati naredbe u vertex shader
 - Ako brzina padne, to je to!

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscravanja • Pandžić, Pejša

41

Traženje uskog grla (3/3)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Faza rasterizacije:
 - 100% na GPU
 - Glavne operacije – sjenčanje točaka i ROP
 - Testiranje sjenčanja točaka:
 - Dodati naredbe u pixel shader ili smanjiti razlučivost
 - Promjena brzine => tu je usko grlo
 - Testiranje ROP:
 - Smanjiti dubinu boje u spremniku boja (npr. 32-bit => 16-bit)
 - Ako brzina poraste, tu je problem!

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscravanja • Pandžić, Pejša

42

Optimizacija aplikacijske faze



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Opća pravila optimizacije koda i pristupa memoriji
 - Npr. izbjegavati dijeljenje, spremati podatke u memoriju redoslijedom korištenja...
 - Koristiti optimizacijske opcije kompilera
 - ...
- ♦ 2 važne strategije:
 - Koristiti paralelizam
 - Optimizirati promjene stanja

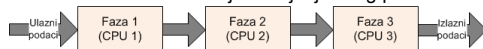
01/03 VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša 43

Paralelizam u aplikacijskoj fazi (1/2)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Grafički algoritmi se često daju paralelizirati
- ♦ Višeprocorska protočnost (vremenski paralelizam):
 - Aplikacijsku fazu podijeliti u protočne podfaze
 - Svaka podfaza se izvodi na zasebnoj CPU jezgri
 - Npr. u sustavu OpenGL Performer:
 - APP – logika aplikacije
 - CULL – odbacivanje poligona
 - DRAW – iscrtavanje
 - Nedostatak – akumulacija kašnjenja zbog protočnosti



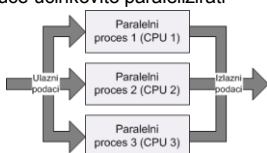
01/03 VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša 44

Paralelizam u aplikacijskoj fazi (2/2)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Paralelno izvođenje (prostorni paralelizam):
 - Pojedine algoritme zamijeniti višedretvenim inačicama
 - Nema akumulacije kašnjenja
 - Neke algoritme nije moguće učinkovito paralelizirati
- ♦ Napomena: mogućnost paralelnog pristupa grafičkom API-ju iz više dretvi uvedena tek u DirectX 11!



01/03 VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša 45

Optimizacija promjene stanja (1/3)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Operacije promjene stanja:
 - Zadavanje spremnika vrhova i spremnika indeksa
 - Zadavanje tekstura
 - Učitavanje i konfiguracija shadera
 - Poziv iscrtavanja
 - ...
- ♦ Te operacije su skupe:
 - Izvode se na CPU
 - Zahtijevaju pražnjenje g.p.s. (npr. priručnih memorija) → prazan hod!
- ♦ Učestale promjene stanja su danas glavni uzrok loših performansi!

01/03 VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša 46

Optimizacija promjene stanja (2/3)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Rješenje – bolje grupirati predmete u sceni!
- ♦ Spajanje predmeta (batching):
 - Više manjih predmeta spojiti u jedan
 - Što ako imaju različite materijale i teksture?
 - Dodati ID predmeta u format vrha, te u shader grananje na temelju ID
 - Time se opterećenje seli u druge faze g.p.s.

01/03 VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša 47

Optimizacija promjene stanja (3/3)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Instanciranje:
 - Ako se isti predmet pojavljuje mnogo puta (npr. drveće)
 - Predmet možemo iscrtat N puta jednim pozivom iscrtavanja
 - Podaci specifični za instancu (npr. transformacije) u posebnom spremniku
- ♦ Organizacija scene s obzirom na stanje:
 - Neki predmeti dijele materijale, shadere i/ili teksture
 - Grupirati ih i iscrtavati slijedno!
 - Manje učinkovito (svaki predmet i dalje ima svoj spremnik vrhova)
 - Najpraktičnije realizirati u sklopu grafa scene

01/03 VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša 48

Optimizacija geometrijske faze



Zavod za telekomunikacije

- Transformacije, osvetljenje, obrezivanje, projekcija i preslikavanje na ekran
- U načelu ne optimiziramo izravno
- Smanjiti količinu geometrije u g.p.s. (odbacivanje, LOD)
- Koristiti mreže trokuta s indeksima, trake trokuta i sl.

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

49

Optimizacija faze rasterizacije



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Koristiti odbacivanje stražnjih poligona
- ♦ Isključiti Z-spremnik ako nije potreban:
 - Npr. crtanje pozadine
- ♦ Koristiti tehnike smanjenja dubinske složenosti:
 - Z-odbacivanje i rani-Z ne isključivati bez razloga
 - Uvesti preliminarni prolaz radi inicijalizacije Z-spremnika
- ♦ Miješanje boja koristiti samo kad je potrebno
- ♦ Koristiti kompresiju tekstura
- ♦ Smanjiti broj svjetala ili pojednostaviti sjenčanje
- ♦ Imati više varijanti pixel shadera
- ♦ Koristiti jednostavniji anti-aliasing
- ♦ Smanjiti razlučivost iscrtavanja

01/03

VO • Tehnike ubrzavanja iscrtavanja • Pandžić, Pejša

50