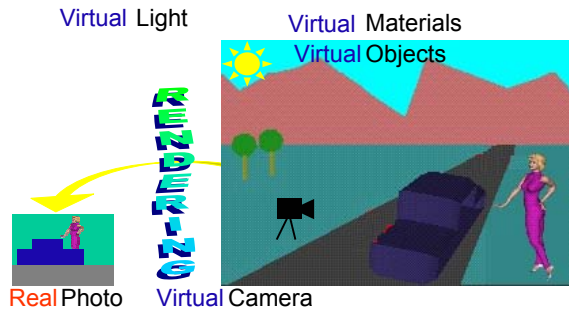


Osnove virtualnih okruženja

Igor S. Pandžić

Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje

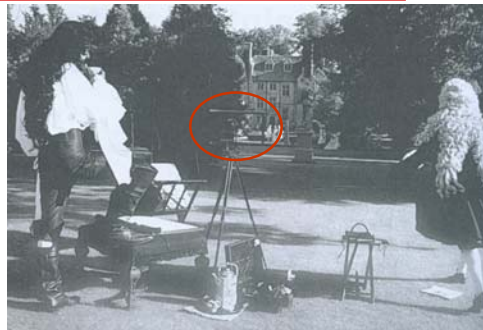
Iscrtavanje (engl. rendering)



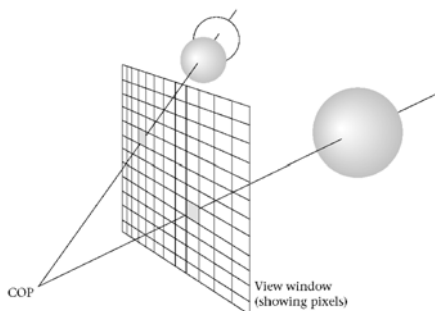
Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje

- ♦ Ray tracing
 - Aplikacijska faza
 - Geometrijska faza
 - Faza rasteriziranja
- ♦ Dodatni efekti
 - Teksturiranje
 - Prozirnost
 - Anti-aliasing
- ♦ Grafičko sklopovlje
- ♦ Druge metode iscrtavanja

Kada slikari „varaju“...



Projekcija



Praćenje zrake (engl. ray tracing)

- ♦ Klasična i široko upotrebljavana metoda
 - Odlično prikazuje refleksije, (oštre) sjene, prozirnost
 - Rezultati „previše realistični“
- ♦ Nije podobno za realno vrijeme (u principu)
- ♦ Relativno jednostavna metoda
 - Odlična za shvaćanje problema iscrtavanja

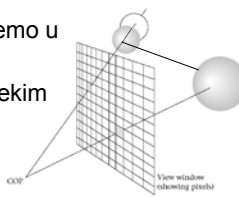


Princip praćenja zrake



Zavod za telekomunikacije

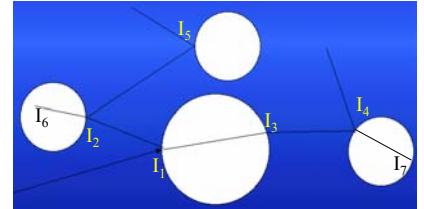
- ♦ Za svaku točku ekrana šaljem u scenu jednu zraku
- ♦ Na prvom sudaru zrake s nekim predmetom računamo osvjetljenje
- ♦ Zraka se lomi i odbija
 - Nastaju dvije nove zrake
 - Rekurzivno ponavljamo na njima postupak
 - Zbrajamo sve doprinose osvjetljenja
 - Rezultat je boja točke na ekranu



Praćenje zrake - primjer



Zavod za telekomunikacije



$$I_1 = I_1^{\text{illum}} + k_2 I_2 + k_3 I_3$$

$$I_2 = I_2^{\text{illum}} + k_5 I_5 + k_6 I_6$$

$$I_3 = I_3^{\text{illum}} + k_4 I_4 + k_7 I_7$$

....

Malo više detalja



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Kako izračunati osnovnu, odbijenu i lomljenu zraku?
- ♦ Što je sa sjenama?
- ♦ Kada zaustaviti rekursiju?
- ♦ Kako naći presjek zrake i predmeta?

Kako izračunati osnovnu zraku?



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Sjetimo se modela kamere
 - Centar projekcije, projekcioni prozor...
- ♦ Projekcioni prozor dijelimo na broj točaka kolika je rezolucija ekrana
- ♦ Problem se svodi na pravac kroz dvije točke

Kako izračunati odbijenu zraku?



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Zrcaljenje oko normale na površinu u točki presjeka zrake s predmetom

$$R = -(2U \cdot N)N - U$$

- U – ulazna zraka
- R – odbijena zraka
- N – normala u točki presjeka (jedinичni vektor)

Kako izračunati lomljenu zraku?



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Snellov zakon

$$\eta_1 \sin \theta_1 = \eta_2 \sin \theta_2$$

- ♦ Indeks loma

$$\eta = c / v$$

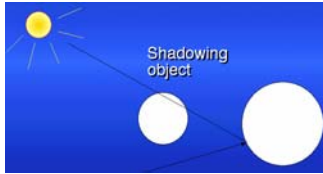
- c: brzina svjetlosti u vakuumu
- v: brzina svjetlosti u promatranom mediju

Što je sa sjenama?



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Od mjesta presjeka šalje se zraka prema izvoru svjetlosti (shadow ray, shadow feeler)
 - Ako se zraka sječe s neprozirnim predmetom, lokalni doprinos osvjetljenja je nula
 - Mogu se uzeti u obzir prozirni predmeti



01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 13

Kada zaustaviti rekurziju?



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Nakon n-te razine rekurzije
- ♦ Još bolje: kada doprinos zrake padne ispod zadanog praga
 - Doprinos pada jer se množi svim faktorima refleksije/prozirnosti preko kojih se dolazi do trenutno promatrane zrake

01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 14

Kako naći presjek zrake i predmeta?



Zavod za telekomunikacije

- ♦ E, to....
- ♦ Za svaku vrstu predmeta, drugačiji postupak
- ♦ Najčešći princip:
 - Uvrstiti jednadžbu zrake u jednadžbu predmeta
 - Zraka: $P = P_0 + \mu U$, $\mu > 0$
 - P_0 – izvor zrake (x_0, y_0, z_0)
 - U – vektor smjera zrake (U_x, U_y, U_z)
- ♦ Banalni primjer: kugla sa središtem u ishodištu
 - $x^2 + y^2 + z^2 = r^2$
 - $(x_0 + \mu U_x)^2 + (y_0 + \mu U_y)^2 + (z_0 + \mu U_z)^2 = r^2$

01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 15

Praćenje zrake - zaključak



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Općenita metoda
 - Za bilo koju vrstu predmeta dovoljno je napisati novi algoritam presjeka
- ♦ Postoje proširenja metode za prirodnije efekte
 - Mekane sjene, defokusiranje, razliveni odsjaji, efekt mliječnog stakla...
- ♦ Najčešće korištena metoda za off-line grafiku

01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 16

Grafički protočni sustav u realnom vremenu



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Niz funkcija koje se izvode jedna za drugom, a koje virtualnu scenu pretvaraju u sliku
- ♦ Funkcije se mogu izvoditi istovremeno, kao na pokretnoj traci
- ♦ Engl. naziv: „Graphics Rendering Pipeline“, za prijatelje samo „Pipeline“
- ♦ Najslabija karika u lancu...
- ♦ Dio funkcija obično izveden u sklopovlju
- ♦ Neke funkcije se mogu paralelizirati
- ♦ Optimizirano za rad s trokutima

01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 17

Glavne faze protočnog sustava



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Aplikacijska faza
 - Operacije specifične za pojedinu aplikaciju
 - Priprema osnovnih elemenata (trokuta), slanje sljedećoj fazi
- ♦ Geometrijska faza
 - Transformacije, projekcije, osvjetljenje
 - Što će se, gdje i kako iscrtati
- ♦ Faza rasteriziranja
 - Konačno iscrtavanje, tj. „punjenje“ pixel-a
- ♦ Glavne faze imaju pod-faze

01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 18

Aplikacijska faza (1/2)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ „Puni“ ostatak protočnog sustava elementima za iscrtavanje u odgovarajućem obliku
 - To su najčešće trokuti, točke i linije
 - Ovo je osnovni zadatak aplikacijske faze
- ♦ Sve „pametne“ stvari se rade ovdje:
 - Logika same aplikacije
 - Animacija
 - Simulacija
 - Ulaz/izlaz
 - Detekcija sudara
 - Ostalo...

Aplikacijska faza (2/2)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Uvijek izvedena programski: najveća kontrola
- ♦ Najčešće nema pod-faza (osim možda korištenjem više procesora)
- ♦ Može jako utjecati na ukupnu brzinu iscrtavanja
 - Npr. odabirom trokuta za iscrtavanje (engl. culling)

Geometrijska faza



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Ulaz: 3D poligoni, svjetla, kamera
- ♦ Izlaz: 2D poligoni u ekranskim koordinatama i sa određenim bojama
- ♦ Zahtjevna faza: oko 100 FP operacija po vrhu
- ♦ Izvedba može biti sklopovska
- ♦ Dijeli se u više pod-faza koje se mogu vršiti istovremeno
- ♦ Programsko sučelje omogućava upravljanje načinom rada kroz određene parametre

Geometrijska faza: pod-faze



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Transformacija u koordinatni sustav kamere
- ♦ Osvjetljenje/bojanje
- ♦ Projekcija
- ♦ Obrezivanje
- ♦ Preslikavanje na ekran

Tipični ulaz u geometrijsku fazu



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Niz trokuta
 - Određeni vrhovima (vertex)
 - Mogu se zadati normale za svaki vrh
 - Može se zadati fiksna boja za trokut ili za svaki vrh
 - Parametri materijala
- ♦ Najveća većina operacija izvodi se na vrhovima, dakle 3D točkama (x,y,z)

Transformacija u koordinate kamere (1/2)



Zavod za telekomunikacije

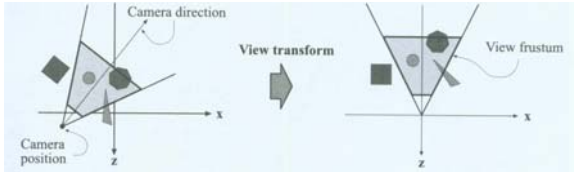
- ♦ Scena je postavljena u globalni koordinatni sustav (engl. world coordinates, world space)
- ♦ Pojedini predmeti su najčešće u lokalnim koordinatama (engl. model coordinates)
- ♦ Potrebno je sve koordinate svesti u koordinatni sustav kamere
 - Kamera je u ishodištu
 - Gledamo u smjeru -z osi
 - Y os je gore, x os desno

Transformacija u koordinate kamere (2/2)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Lokalni KS i KS kamere određeni matricama
- ♦ Transformacija točke u KS kamere svodi se na množenje točke jednom matricom
 - Malo više o ovome u predavanju o transformacijama



01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 25

Osvjetljenje/bojanje



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Ako je boja direktno zadana, ne koristi se osvjetljenje pa nema posla
 - 3D efekt obično nije jako dobar
- ♦ Osvjetljenje se računa modelom s prošlog predavanja
- ♦ Normala, materijal, svjetla, položaj kamere -> model osvjetljenja daje boju
 - Računa se za poligon ili za svaki vrh
- ♦ OK, imamo boju vrha, sto je sa ostatkom poligona?

01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 26

Projekcija



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Sjećate li se projekcionog volumena?
- ♦ Projekcioni volumen se transformira u jediničnu kocku $(-1 -1 -1) (1 1 1)$
 - x i y su normalizirane projicirane koordinate
 - z daje dubinu, to će nam još zatrebati
 - Operacija se vrši matricom za ortogonalnu ili perspektivnu projekciju (detalji u predavanju o transformacijama)

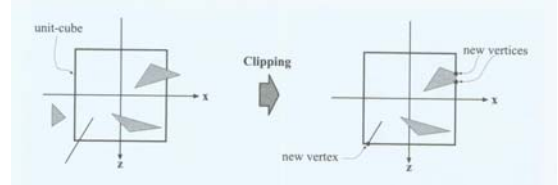
01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 27

Obrezivanje (engl. clipping) (1/2)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Odbacuju se poligoni koji su izvan jedinične kocke
- ♦ Od onih koji presijecaju granice nastaju novi, krnji poligoni



01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 28

Obrezivanje (engl. clipping) (2/2)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Sutherland-Hodgeman algoritam
 - Obrezuje se jedna po jedna stranica kocke



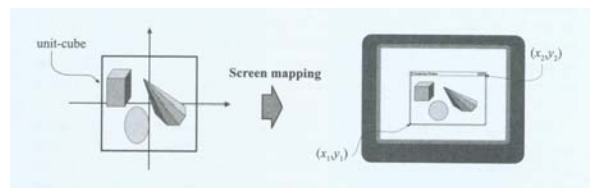
01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 29

Preslikavanje na ekran



Zavod za telekomunikacije

- ♦ x i y se transformiraju u koordinate ekrana
 - Jednostavna linearna operacija $x_s = ax_n + b$
- ♦ z ostaje nepromijenjen



01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 30

Faza rasteriziranja



Zavod za telekomunikacije

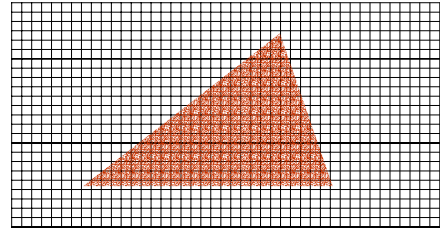
- ♦ Engl. rasterisation, scan conversion
- ♦ Upisuje boju u pojedine točke (pixel) ekrana
- ♦ Određuje vidljivost točaka
- ♦ Obavlja razne dodatne funkcije (detalji kasnije)
 - Teksturiranje, prozirnost, anti-aliasing, efekti zamućenosti...
- ♦ Gotovo uvijek sklopovska izvedba, inače sporo

Koje točke popuniti



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Popunjava se liniju po liniju
- ♦ U pripremnoj fazi račun početnih točaka i nagiba
- ♦ Tokom izvršne faze samo operacije zbrajanja

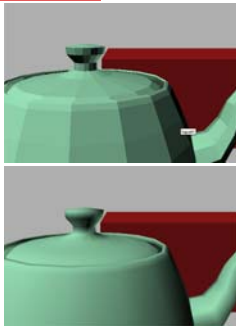


Kojom bojom popuniti točku



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Ista boja za cijeli poligon (flat shading)
- ♦ Interpolacija boje (Gouraud shading)
 - Poznata je boja na vrhovima
 - Ostatak se linearno interpolira unutar poligona
- Interpolacija normale (Phong shading) previše zahtjevna za realno vrijeme

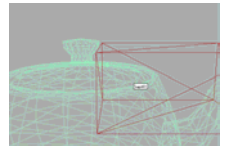


Određivanje vidljivosti



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Klasičan problem 3D grafike
- ♦ Postoji niz rješenja
 - Slikarska tehnika
 - BSP stablo
 - Ray casting...
- ♦ Za realno vrijeme najpopularnija metoda Z-spremnika (Z-buffer)
 - Potrebna je dodatna memorija (Z-spremnik) u koju se sprema dubina objekta na svakoj točki ekrana
 - Vrlo jednostavan algoritam, a memorija nije skupa



Metoda Z-spremnika



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Prije crtanja, sve vrijednosti u Z-spremniku postavljaju se na maksimalnu vrijednost (1.0)
- ♦ Prilikom crtanja svake točke svakog poligona:
 - Ako je dubina točke poligona koji crtamo veća od vrijednosti u Z-spremniku za točku ekrana, znači da je na ekranu već nacrtan poligon koji je bliži od ovoga kojeg upravo crtamo, dakle preskačemo
 - U protivnom upisujemo točku u spremnik boje („ekran“), a dubinu u Z-spremnik

Dodatni efekti



Zavod za telekomunikacije

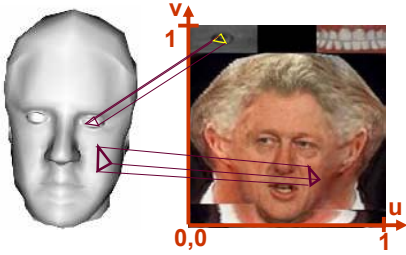
- ♦ Sve do sada su bile najosnovnije funkcije grafičkog protočnog sustava
- ♦ Još neke funkcije su standardno podržane:
 - Teksturiranje
 - Prozirnost
 - Anti-aliasing

Teksturiranje (engl. texture mapping)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ U osnovi: „lijepljenje“ slike na geometriju
- ♦ Za svaki vrh imamo koordinate tekstuure u, v



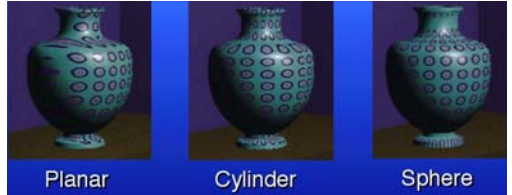
01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 37

Računanje koordinata tekstuure



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Ručno zadane
- ♦ Izračunate projekcijom (ortogonalna, cilindrična, kuglasta)
- ♦ Izračunate dinamički za specijalne efekte



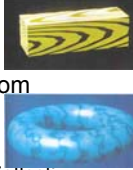
01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 38

„Boja pixela“ iz tekstuure



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Umjesto slike može 2D ili 3D funkcija
- ♦ Vrijednost dobivena iz tekstuure može se miješati na razne načine s rezultatom modela osvjetljenja za isti pixel
 - Težinsko miješanje vrijednosti
 - Utjecaj tekstuure na parametre modela svjetlosti
 - Prozirnost (alpha mapping), itd.
- ♦ Ovo je tek dio mogućih efekata teksturiranja
 - Za sada najpoznatije metode
 - Malo više za koji tjedan



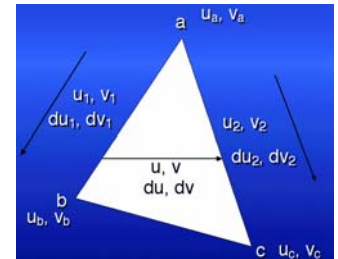
01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 39

Interpolacija u, v koordinata (1/3)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Obavlja se u rasterizacijskoj fazi
- ♦ Naivni pristup:



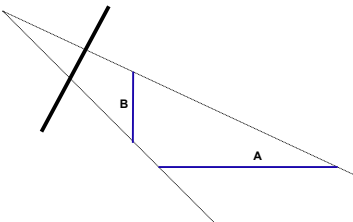
01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 40

Interpolacija u, v koordinata (2/3)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Problem: afino preslikavanje ne uzima u obzir perspektivu

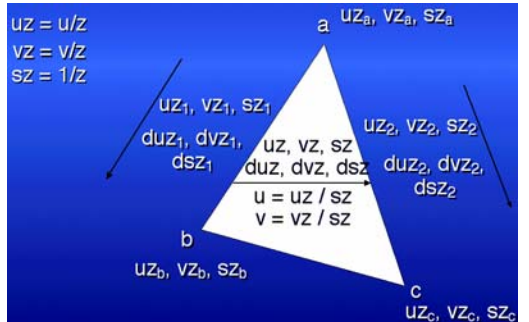


01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 41

Interpolacija u, v koordinata (3/3)



Zavod za telekomunikacije

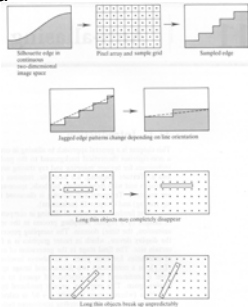


01/03 OVO • Uvod u 3D grafiku II: Iscrtavanje • Igor S. Pandžić 42

- ♦ U realnom vremenu samo ograničeni efekt
 - Nema refrakcije, apsorpcije, promjene prozirnosti u ovisnosti o kutu gledanja...
- ♦ Materijal predmeta sadrži faktor prozirnosti α
 - $\alpha = 0.0 \rightarrow$ potpuno prozirno
 - $\alpha = 1.0 \rightarrow$ potpuno neprozirno

- ♦ Prvo iscrtati sve neprozirne poligone
- ♦ Iscrtati sve prozirne poligone redom od najdaljeg do najbližeg kameri
- ♦ Boja pixela se računa „over“ funkcijom:
 - $c = \alpha c_p + (1 - \alpha) c_b$
 - C_p = doprinos boje poligona koji se trenutno crta
 - C_b = dosadašnji sadržaj pixel-a
 - Ova funkcija je ovisna o redoslijedu izvođenja, dakle ukoliko poligoni ne idu pravim redoslijedom nastaju pogreške

- ♦ Aliasing: efekt uzorkovanja nedovoljnom frekvencijom
 - U grafici se očituje stepeničastim rubovima i drugim nepoželjnim efektima
- ♦ Rješenje je općenito u uzimanju više uzoraka
 - U grafici to znači računanje više točaka nego što ćemo prikazati na ekranu, zatim njihovo filtriranje na odgovarajuću rezoluciju



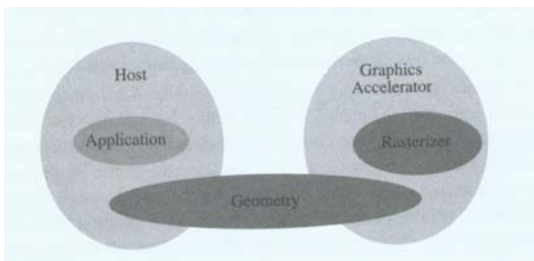
- ♦ Arhitektura grafičkog sklopovlja
- ♦ Video upravljačka jedinica
- ♦ Spremnici i memorija



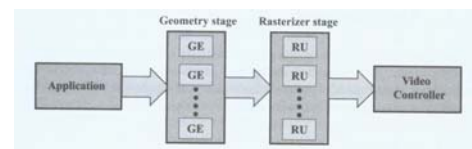
1995.



2003.



- ♦ Poopćena i pojednostavljena slika
- ♦ Izazovi
 - Ujednačavanje tereta
 - Komunikacije
 - Jedinice nisu potpuno nezavisne

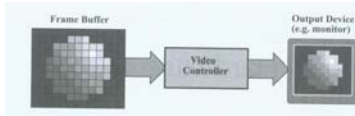
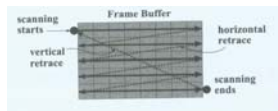


Video upravljačka jedinica (1/2)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Digitalno-analogna pretvorba
 - Boje točaka u spremniku boje prenose se na ekran
- ♦ Brzina osvježavanja 60-120 Hz
 - Ispod 72 Hz može se već zamijetiti titranje (flicker)



Video upravljačka jedinica (2/2)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Frekvencija osvježavanja je višekratnik mogućih efektivnih frekvencija iscrtavanja
- ♦ Primjer:
 - 75Hz – osvježavanje svakih 13.33 ms
 - Ukoliko protočni sustav generira sliku svakih 10 ms (teoretski 100 Hz), svejedno će vidljiva frekvencija biti 75 Hz
 - Ukoliko p.s. generira sliku svakih 20 ms (teoretski 50 Hz), vidljiva frekvencija će biti 37.5 Hz

Spremnici i memorija



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Spremnik okvira (frame buffer)
 - Spremnik boje (color buffer)
 - Z-spremnik (Z-buffer)
 - Dvostruko spremanje (double buffering)
 - Stereo spremnici
 - Spremnik šablone (stencil buffer)
 - Akumulacijski spremnik
- ♦ Memorija za teksture
- ♦ Memorija za geometrijsku fazu

Spremnik okvira (frame buffer)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Sprema sve što je potrebno za sliku
 - Boja
 - Dubina
 - Prozirnost
 - Specijalni efekti
- ♦ Sastoji se od više spremnika
- ♦ Zapremina se izražava u bitovima po točki (bits per pixel)
 - Ova vrijednost se ponekad naziva dubinom spremnika

Spremnik boje (color buffer) (1/2)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Sadrži sliku koja ide na ekran
- ♦ što više bitova, to više boja
- ♦ Indeksirana boja
 - 8 bpp, 256 boja iz tablice
- ♦ „High color“
 - 15 ili 16 bpp ~ 32 ili 64 tisuće boja
 - 5 bitova za svaku boju – 32 nivoa
 - Mach banding problem

Spremnik boje (color buffer) (2/2)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ True color ili RGB boja
 - 3 ili 4 byte-a po točki – 16.8 miliona boja
 - RGBA uključuje prozirnost (alpha channel)
- ♦ Interno, ili u programskom sučelju, često veća preciznost radi računskih operacija

Z-spremnik (Z-buffer)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Koristi se za izračun vidljivosti
- ♦ Tipično 16-32 bpp
- ♦ Primjer
 - Razmak između bliske i daleke odrezujuće plove 100 m u globalnim koordinatama
 - Uz 16 bpp, preciznost 100 m / $2^{16} \sim 1.5$ mm
 - Zbog perspektivne projekcije, veća preciznost na bližim udaljenostima
- ♦ Za dobre rezultate vidljivosti treba maksimalno približiti daleku odr. plohu, i (pogotovo) maksimalno udaljiti blisku o.p.

Dvostruko spremanje (double buffering)



Zavod za telekomunikacije

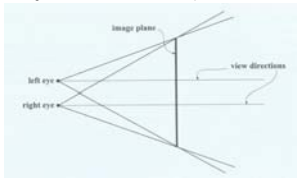
- ♦ Naivni pristup iscrtavanju
 - Rasterizator crta u spremnik boje (koji se svaki puta prethodno obriše)
 - Istovremeno, video u.j. iz spremnika crta na ekran
 - Dobivamo slike u raznim fazama dovršenosti, tj. nemirnu sliku
- ♦ Dva spremnika: prednji i stražnji (back, front)
 - Rasterizator crta u stražnji spremnik koji se ne vidi, jer video u.j. crta na ekran uvijek prednji spremnik
 - Kada je slika spremna, izvršava se zamjena uloga spremnika (swap), tj. stražnji postaje prednji
 - U sljedećem iscrtavanju na ekran video u.j. posluži novu sliku

Stereo spremnici



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Koriste se za stereoskopsku sliku
 - Za svako oko se iscrtava posebna slika, kao u stvarnosti (pomak među virtualnim kamerama)
 - Raznim tehnikama se korisniku prikazuje posebna slika za lijevo i desno oko (više o tome u VR)



Spremnik šablone (stencil buffer)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Koristi se za specijalne efekte
 - Maskiranje, miješanje slika
 - Sjene
- ♦ Princip rada
 - U spremnik se nacrtava šablona
 - Prilikom kasnijeg iscrtavanja boje, sadržaj šablona u svakoj točki određuje krajnji rezultat
 - Npr. crta se samo unutar šablona
 - Šablona se može raznim operatorima kombinirati sa spremnikom boje ili Z-spremnikom
- ♦ Obično 1-8 bpp



Akumulacijski spremnik



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Koristi se za efekte „omekšavanja“
 - Anti-aliasing, mekane sjene, zamućenost pri gibanju (motion blur), defokusiranost (depth of field)
- ♦ Akumuliraju se rezultati nekoliko iscrtavanja, uz laganu promjenu nekog parametra
- ♦ Obično dvostruko bpp od spremnika boje
 - Potrebna veća preciznost prilikom zbrajanja više slika

Memorija za teksture



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Teksture se koriste pri svakom novom iscrtavanju, dakle izuzetno često
- ♦ Stoga ih je dobro iz glavne memorije preseliti u memoriju grafičkog sklopovlja
- ♦ Što više memorije za teksture, to bolje...

Memorija za geometrijsku fazu



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Može imati spremnik lista za iscrtavanje
- ♦ Engl. display list: niz grafičkih naredbi za iscrtavanje elemenata koji se sprema u memoriju za ponovnu uporabu
 - Npr. niz naredbi koje iscrstavaju kompleksni predmet koji se ne mijenja
 - Lista se jednom spremi, te zatim više puta koristi

Memorijske potrebe (primjer)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Pretpostavimo da je rezolucija 1280x1024
- ♦ True color (24bpp): $1280 \times 1024 \times 24b = 3.75MB$
- ♦ Dvostruki spremnik: $x2 = 7.5MB$
- ♦ Šablona 8 bpp, akumulacijski 48 bpp = 8.75MB
- ♦ Z-spremnik 24 bpp = 3.75MB
- ♦ Ukupno 20 MB
 - Prozirnost 8 bpp: +1.25 MB
 - Stereo: dvostruki spremnik boje: +7.5MB
 - +teksture, liste za iscrtavanje: 128MB i više nije ništa neobično za grafičku karticu

Komunikacija sa grafičkim sklopovljem



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Šalju se ogromne količine podataka
- ♦ Protočnost ove veze je kritična
- ♦ „Pull“ model
 - Aplikacija upisuje podatke u memoriju sustava, grafičko sklopovlje čita
- ♦ „Push“ model
 - Aplikacija šalje podatke direktno grafičkoj kartici

Ostale metode iscrtavanja



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Isijavanje
- ♦ Iscrtavanje volumena
- ♦ Nisu u centru pažnje ovog kolegija, samo radi informiranosti

Isijavanje (engl. radiosity)



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Zasniva se na teoriji isijavanja energije
- ♦ Odlično modelira difuzne efekte svjetla
 - Efekt nezavisan od kuta gledanja: jednom izračunat rezultat može se promatrati u realnom vremenu



Vizualizacija volumena



Zavod za telekomunikacije

- ♦ Reprezentacija voxel-ima →
- ♦ Prikaz uz različite stupnjeve prozirnosti pojedinih slojeva



- ♦ **Real-Time Rendering**, T. Möller, E. Haines, A K Peters
- ♦ **www.realtimerendering.com** - izvrstan web site!!
- ♦ **3D Computer Graphics**, Alan Watt, Addison-Wesley
- ♦ **Introduction to Computer Graphics**, Foley, Van Dam, Hughes, Phillips, Addison-Wesley
- ♦ **www.geocities.com/jamisbuck/raytracing.html**
- ♦ **www.cs.otago.ac.nz/cosc342/RayNotes.pdf**
- ♦ **<http://cs.wpi.edu/~matt/courses/cs563/talks/radiosity.html>**