

1. UVOD

1.1 DEFINICIJA VIRTUALNOG OKRUŽENJA

Virtualni predmet – predmet definiran u memoriji računala na način da ga računalno može prikazati na zaslonu korisniku uz mogućnost interakcije

Definicija predmeta – opis geometrije i materijala

Interaktivni prikaz – prikaz u kojem korisnik u stvarnom vremenu upravlja parametrima prikaza

Virtualno okruženje – složeniji skup virtualnih predmeta

Elementi simulacije:

- ◆ Vizualna simulacija – najvažniji element simulacije u VO
- ◆ Zvučna simulacija – reprodukcija ili generiranje zvukova u VO (može uključivati i tehnike 3D zvuka za lociranje izvora)
- ◆ Hipatička simulacija – simulacija dodira ili sile (složena i skupa oprema) koja se temelji na vibrirajućim ili termičkim elementima koje korisnik nosi na prstima i koji se aktiviraju kada korisnik „dodirne“ virtualni predmet (precizno praćenje položaja korisnika u odnosu na simulaciju predmeta)
- ◆ Fizikalna simulacija – davanje fizikalnih svojstava virtualnim predmetima (sudar, masa, gravitacija,...)

Elementi sučelja čovjek – računalno:

◆ **Izlazni:**

- ◆ Zaslona
- ◆ Projekcijska platna
- ◆ Head Mounted Display
- ◆ Zvučnici, slušalice

◆ **Ulazni:**

- ◆ Miš
- ◆ Tipkovnica
- ◆ Joystick

1.2 ORGANIZACIJA POJMOVA

Razlikujemo 2D i 3D računalnu grafiku. Razlika između dvodimenzionalnog i trodimenzionalnog prikaza je u internom prikazu podatka. Kod 3D grafike računalno ima potpunu trodimenzionalnu definiciju predmeta te ga može prikazati sa svih strana

- ◆ **2D**
- ◆ **3D off-line grafika** – visoka kvaliteta, moguće kompleksne slike – specijalni efekti, računalna animacija
- ◆ **3D grafika u stvarnom vremenu** – manja kvaliteta, moguća interakcija (barem 10 slika u sekundi, u praksi 30-60)

Umrežena virtualna okruženja – omogućuju sudjelovanje više korisnika putem mreže (u stvarnom vremenu)

Virtualna stvarnost – skup tehnologija kojima se korisnikova slika stvarnosti nastoji što potpunije zamijeniti slikom virtualnog okruženja (u stvarnom vremenu)

Proširena stvarnost – slika virtualnog svijeta miješa se sa slikom stvarnog svijeta (u stvarnom vremenu)

Virtualni ljudi – simulacije ljudi na računalu (u stvarnom vremenu i off-line)

CAD (Computer Aided Design) – tehnologije koje koriste 3D u stvarnom vremenu prilikom postupka dizajna, a ponekad i off-line tehnike (u stvarnom vremenu i off-line)

1.3 PRIMJENE VIRTUALNIH OKRUŽENJA

- ◆ **Film i televizija** – film se ne radi u stvarnom vremenu, ali osnovne tehnologije su slične ili iste dok za televiziju postoje interaktivni programi u stvarnom vremenu
 - **Virtualna pozornica** – prezentator se snima ispred plavog ili zelenog zida, a pozornica se iscrtava postupkom video miješanja
 - **Virtualni prezentator** – mogu se pripremiti unaprijed ili interaktivno
 - **Proširena stvarnost** – dodane linije cilja u utrka, različite reklame na stadionu i televiziji
- ◆ **Igre** – najnaprednije tehnologije grafike u stvarnom vremenu, tržišno najzanimljivije područje
 - **Jezgra igre** – nekada se igra programirala od početka do kraja, danas se koriste gotove jezgre s podržanom grafikom i interakcijom na koje se nadodaje logika
- ◆ **Dizajn i projektiranje** – automobilska i tekstilna industrija, arhitektura,...
- ◆ **Simulacija**
 - **Vojska** – oružje, strategije
 - **Psihijatrija** – PTSP, fobije
 - **Medicina** - kirurgija
 - **situacije rijetke u stvarnosti** – svemirski letovi, gašenje požara
- ◆ **Vizualizacija** - pomaže lakšem poimanju podataka te često omogućava pronalaženje činjenica i zakonitosti koje bi bilo nemoguće uočiti pregledom podataka u numeričkom ili tekstualnom obliku
 - **Medicina** – MR, UZV, CT
 - **Kemija, biologija** – molekularna vizualizacija
 - **Geografija** – široka primjena
- ◆ **Predstave, događaji, marketing** – virtualne scene su atraktivan dio raznih događanja te pružaju široku mogućnost promocije
- ◆ **Ostalo**

2. MODELIRANJE VIRTUALNE SCENE

2.1 VIRTUALNA SCENA

Virtualna scena – prikaz virtualnog okruženja u memoriji računala koji zahtjeva svjetlost, promatrača i predmet – analogno fotografiji

Elementi virtualne scene:

- ◆ **virtualni predmet**
- ◆ **virtualni materijal**
- ◆ **virtualna svjetlost**
- ◆ **virtualna kamera**

2.2 OPIS VIRTUALNE SCENE

Problem – sve što je virtualno postoji samo u memoriji računalakoja je digitalna, pa se nameće pitanje kako prirodne predmete i pojave prikazati virtualno te kako iz toga dobiti sliku

Rješenje – modeliranje i iscrtavanje ☺

2.3 MODELIRANJE I DIGITALNI PRIKAZ PREDMETA

Parametarski prikaz – nedovoljno općenit, potrebni parametri za svaki novi predmet, a neke je i nemoguće opisati parametrima

Prikaz jediničnim elementima – trokuti ili četverokuti kojima se aproksimira površina cijelog 3D predmeta; što više elemenata, tj. što su oni sitniji, to je aproksimacija bolja, ali više elemenata znači veći utrošak i više posla za procesor

Vrste modela – čvrsti modeli i modeli površina

Metode:

- ◆ **Poligoni**
 - najčešći i najrašireniji način prikaza geometrije
 - prikaz osnovnim elementima (trokut, četverokut)
 - zajednički nazivnik svim metodama, jako općenit prikaz
 - računala posjeduju sklopovlje optimizirano za iscrtavanje virtualnih scena sastavljenih od poligona (trokut)
 - često se drugi oblici prikaza neposredno prije ispisa na zaslon pretvaraju u poligone
 - aproksimativna metoda – što više poligona to je bolji prikaz zakrivljenosti plohe
 - nije pogodno za ručno modeliranje – dugotrajan i složen postupak
 - koriste se za interni prikaz podataka
 - vrh (vertex), brid (edge), stranica ili poligon (face)
- ◆ **Konstruktivna geometrija čvrstih tijela (Construtive Solid Geometry)**
 - najbolji primjer parametarskog prikaza
 - jednostavna i intuitivna metoda za korištenje
 - osnovni elementi (kvadar, kugla, valjak, stožac, torus) slažu se jednostavnim operacijama zbrajanja, oduzimanja i presjeka.

- Popularna metoda u strojarskim aplikacijama
- podržavaju ju skoro svi CAD paketi
- dvije skupine algoritama:
 - spremnik predložka za učinkovito prikazivanje rezultata na zaslonu (ne postoje podaci o geometriji konačnog objekta u memoriji)
 - računanje modela konačnog objekta i spremanje u memoriju

◆ Parametarske krivulje i plohe

- matematičke formule – parametri mijenjaju oblik krivulje/plohe
- većina krivulja spada u *spline* kategoriju
- intuitivni parametri, predočavaju se točkama, tangentama i sl.
- formula krivulje skrivena od korisnika
- Bezierova kubična krivulja
 - mijenja se pomicanjem točaka P_0 - P_3
 - $Q(u)=P_0(1-u)^3+P_13u(1-u)^2+P_23u^2(1-u)+P_3u^3$
 - jedna od prvih parametarskih krivulja u grafici
- NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline)
 - danas među najpopularnijima
 - široka mogućnost kontrole krivulje
- Bezier, Hermite, B-spline, β -spline, NURBS
- Bezierova kubična ploha
- primjena počela u automobilske industriji
- NURBS sastavni dio svakog općenitog alata za modeliranje
- oblikovanje prirodnih oblika

◆ Razdjelne plohe

- iterativna razdioba poligona u nekom jednostavnijem geometrijskom obliku
- popularna – omogućuje modeliranje relativno jednostavnih osnovnih modela te zatim postizanje proizvoljne glatkoće
- Catmull-Clarkova metoda
 - osnovni model poligon
 - točka brida – sredina između središnje točke brida i sredine između dviju točaka stranice iz stranica koje dijele taj brid
 - točka stranice – aritmetička sredina svih točaka u poligonu
 - točka vrha – zbroj koordinata starog vrha pomnoženih s $(n-3)/n$, koordinata točaka stranice pripadajućih poligona pomnoženih s $1/n$ te koordinata srednjih točaka bridova

koji dotiču vrh pomnoženih s $2/n$ – dobiva se točka blizu starog vrha, ali najčešće se s njim ne poklapa točno

- svaka točka stranice spaja se s točkom brida koja se zatim spaja s točkom vrha, koja se spaja s točkom brida iz susjednog brida i poligon se zatvara povratkom na točku stranice
- WTF???

◆ Brišuće plohe

- stvaraju se povlačenjem krivulje linearno, kružno ili po drugoj krivulji
- najčešće linearno povlačenje (ekstruzija) i rotacijsko povlačenje
- mijenjanje središta rotacije mijenja oblik

◆ Volumenske reprezentacije

- ideja prikaza osnovnim elementima, ali popunjava se čitav prostor
- bitno za primjene u kojima je potrebno modelirati složenu unutrašnju strukturu predmeta (anatomija, geologija)
- podjela prostora na male 3D ćelije (voxels)
- ćelije opisuje popunjenost, boja, gustoća,...
- zahtijeva velike količine memorije
- metoda povećanja učinkovitosti memorije: oktalno stablo
 - rekurzivna metoda
 - podjela na 8 dijelova
 - zaustavlja se kada je promatrani dio potpuno pun, potpuno prazan ili manji ili jednak zadanom pragu veličine
 - smanjuje se veličina zapisa, postiže se učinkovitija obrada

◆ Fraktali

- fragmentirani, nepravilni geometrijski objekti koji pokazuju svojstvo samosličnosti
- obično rekurzija – u svakoj iteraciji objekt je transformiran inačica prethodnog objekta
- proizvoljna razina detalja
- modeliranje prirodnih pojava – pomoću njih se proizvode fantastične slike
- primjena u praksi ograničena zato što parametri formula nisu intuitivni već se moraju eksperimentalno mijenjati dok se ne postigne željeni efekt

◆ Sustavi čestica

- simulacija velikog broja jednostavnih čestica
- točka, crtica i sl.
- najzanimljivije svojstvo – dinamičnost
- parametri: položaj, boja, oblik
- pravila i funkcije za pomicanje, mijenjanje, nestajanje, nastajanje
- interakcija među česticama
- pogodno za simulaciju prirodnih pojava (vodopad, vatra, dim)

◆ Modeliranje zasnovano na slikama

- složene zadatke nemoguće ostvariti ručnim metodama
- potrebni automatski ili poluautomatski postupci
- tijekom modeliranja automatskih postupaka:
 - prikupljanje oblaka točaka
 - lasersko skeniranje – vrlo precizno, ali skupo (koristi se samo kad je neophodna velika preciznost)
 - generiranje točaka iz niza fotografija
 - korištenje dubinske kamere (Kinect)
 - generiranje geometrije iz točaka – rezultat je niz trokuta koji određuju 3D objekt
 - teksturiranje – određivanje izgleda materijala
- popularno područje – razvoj digitalne fotografije
- više fotografija iz različitih kuteva
- identificirati iste dijelove objekta
- izračunati točku gledišta i pozicije točaka u prostoru

2.4 MODEL KAMERE

- ◆ određuje pogled u virtualnu scenu koji će se iscrtati
- ◆ zasniva se na projiciranju scene na projekcijsku plohu
- ◆ vrste projekcija:
 - ortogonalna
 - perspektivna
 - središte projekcije – točka iz koje se promatra scena
 - projekcijski prozor – definira gdje se slika projicira
 - normala na projekcijsku plohu
 - bliska i daleka odrezujuća ploha – ograničavaju projekcijski volumen

2.5 MODEL OSVJETLJENJA

- ◆ služi za računanje osvjetljenja (boje) u promatranoj točki predmeta u sceni
- ◆ ovisi o materijalu predmeta, svjetlima te relativnom položaju kamere, svjetala i predmeta

- ♦ u stvarnosti **efekti globalnog osvjetljenja**: svjetlost dolazi iz svjetlosnih tijela i odbija se od predmeta pri čemu dobivamo efekte kao što su mekane sjene, razlijevanje boje, odrazi itd.
- ♦ **lokalno osvjetljenje** – osvjetljenje jednog predmeta iz izvora svjetlosti
- ♦ **refleksija, refrakcija, rasipanje, apsorpcija, lom,...**
- ♦ postoje algoritmi za većinu svjetlosnih efekata, ali često su skupi – za realno vrijeme uvijek aproksimacije – jednostavni model izvora svjetlosti uz zanemarivanje dijela globalnih ili lokalnih efekata

2.5.1 MODELI IZVORA SVJETLOSTI

- ♦ **ambijentno svjetlo** – gruba aproksimacija globalnog osvjetljenja koja daje minimalno osvjetljenje kojim se izbjegava pojava da predmeti na koje ne pada svjetlost budu potpuno crni – daje jednoličnu boju zbog koje se gubi 3D izgled
- ♦ **usmjereno svjetlo** – određuju ga smjer i intenzitet, a može se usporediti sa Sunčevim svjetlom; može biti ograničen radijusom djelovanja
- ♦ **točkasto svjetlo** – isijava iz jedne točke u svim smjerovima jednako
- ♦ **reflektor** – isijava samo u smjerovima određenim njegovim stošcem (često 2)

2.5.2 MODEL ODBIJANJA SVJETLOSTI

- ♦ koristi se za računanje lokalnog efekta osvjetljenja
- ♦ **Phongov model**
 - najčešće korišteni model za grafiku u stvarnom vremenu
 - zanemaruje refrakciju
 - modelira difuzno i spekularno odbijanje te globalno osvjetljenje pomoću aproksimacije ambijentnim svjetlom
 - jednostavan za računanje
 - dobra aproksimacija
 - tri komponente:
 - ambijentna – karakteriziraju je intenzitet I_a (konstanta za cijelu scenu) te ambijentni koeficijent materijala k_a (reakcija materijala na ambijentnu svjetlost) – vektori boje sastavljene od R, G i B komponente
 - difuzna – opisuje Lambertov zakon koji opisuje difuzno odbijanje svjetla na predmetu; difuzna komponenta proporcionalna je intenzitetu izvora i difuznom koeficijentu materijala k_d , a opisuje ju skalarni produkt vektora smjera upadne zrake i normale na površinu

- spekulativna – aproksimira spekularni odsjaj na predmetu, a karakterizira ju krivulja sa oštrim maksimumom koji je izraženiji za sjajnije materijale (idealni materijal – ogledalo); proporcionalna je intenzitetu izvora i spekularnom koeficijentu materijala k_a

2.5.3 MODEL MATERIJALA

- ◆ opisuje kako materijal odbija svjetlost, tj. daje materijalu svojstva koja se manifestiraju kao boja predmeta, sjaj, prozirnost
- ◆ osnovni model materijala sadržan je u modelu odbijanja svjetlosti na sljedeći način:
 - koeficijenti odbijanja ambijentne, difuzne i spekularne komponente k_a , k_d i k_s
 - spekularni faktor n
 - ukoliko se simulira prozirnost, postoji i faktor prozirnosti te koeficijent refrakcije

3. GEOMETRIJSKE TRANSFORMACIJE

3.1 OPĆENITO O TRANSFORMACIJAMA

- ♦ operacije koje se primjenjuju na geometriji objekta kako bi ga transformirali, odnosno rotirali, pomaknuli, promjenili mu veličinu, reflektirali ga ili napravili posmak
- ♦ fundamentalna uloga u računalnoj grafici

3.2 OSNOVE 2D GEOMETRIJSKE TRANSFORMACIJE

- ♦ točka u 3D prostoru: uređen skup vrijednosti koordinata (P_x, P_y, P_z) ili vektor $[P_x \ P_y \ P_z]$
- ♦ da bismo transformirali neki geometrijski objekt potrebno je transformirati sve njegove vrhove
- ♦ **osnovne geometrijske transformacije**
 - **translacija**
 - pravocrtno pomicanje točke/objekta na ravni/prostoru
 $P'=[P_x+T_x \ P_y+T_y]$
 - vektor translacije
 - **rotacija**
 - rotacijom točke P oko ishodišta za kut α dobivamo točku P':
 $P'=[P_x \cos \alpha + P_y \sin \alpha \ -P_x \sin \alpha + P_y \cos \alpha]$
 - točke objekta pomiču se po imaginarnoj kružnici
 - **promjena veličine**
 - množenje točke s faktorom skaliranja $S=[S_x \ S_y]$
 - promjena veličine odgovara promjeni veličine vektora
 $P'=[P_x S_x \ P_y S_y]$
 - **smik**
 - deformacija objekta uzduž koordinatnih osi
 $P'=[P_x + P_x k \ P_y]$ $P'=[P_x + P_y k \ P_y]$
 - **kombinacija transformacija**
 - zapis pomoću matrica omogućuje nam jednostavanu kombinaciju transformacija
 - množenje matrica nije komutativno, treba paziti na redosljed
 - problem: translacija se ne može pokazati pomoću transformacija

3.3 HOMOGENE KOORDINATE

- ♦ prikaz 2D točke uređenom trojkom $[P_x \ P_y \ w]$
- ♦ za naše potrebe $w=1$
- ♦ omogućuju prikaz translacije pomoću matrica
- ♦ karakteristične matrice za svaku transformaciju
- ♦ kombinacija 2D transformacija – uzastopno množenje matrica

3.4 OSNOVNE 3D GEOMETRIJSKE TRANSFORMACIJE

- ♦ **translacija, rotacija, promjena veličine, smik i kombinacija**
- ♦ svaka transformacija ima karakterističnu matricu dimenzija 4x4 koja ju opisuje
- ♦ jednostavna primjena kombiniranja transformacija

3.5 MATRICA KAO KOORDINATNI SUSTAV

- ♦ **lokalni koordinatni sustav** – dobiva se transformacijama globalnog KS
- ♦ matrica dimenzija 4x4: prva tri reda su vektori smjera koji tvore osi lokalnog koordinatnog sustava, a zadnji red je translacija
- ♦ transformacije lokalnog koordinatnog sustava mogu se kombinirati

3.6 PRIKAZ ROTACIJE

3.6.1 ROTACIJA OKO PROIZVOLJNE OSI r ZA KUT φ

- ♦ prikaz jednostavan za razumijevanje – popularan
- ♦ ideja: transformirati KS tako da se os r poklopi s osi x globalnog KS-a, rotirati točku za kut φ oko osi x te ju vratiti u KS sustava r inverznim transformacijama
- ♦ moguće izvršiti rotaciju oko bilo koje globalne osi

3.6.2 EULEROVI KUTOVI

- ♦ rotacija se definira kao kombinacija triju osnovnih rotacija oko osi:
 $R=R_z(r)R_x(p)R_y(h)$
 - **h** → skretanje
 - **p** → poniranje
 - **r** → valjanje
- ♦ definiran redosljed operacija: h pa p pa r
- ♦ intuitivan i jednostavan model
- ♦ problem: blokada kardana (poništenje osi u rotaciji odnosno efekt poravnavanja) i uporaba u interpolaciji

3.6.3 QUATERNION

- ♦ tri imaginarne komponente kompleksnog broja za koje vrijedi $i^2=j^2=k^2=ijk=-1$
- ♦ točka P izražena kao quaternion: $p=(p_x, p_y, p_z, 1)=ip_x+jp_y+kp_z+1$
- ♦ **rotacija za 2φ** : $q=(u_q \sin\varphi, \cos\varphi)$
- ♦ uzastopna rotacija dobiva se množenjem quaterniona

3.7 PROJEKCIJA

- ♦ oblik transformacije koja 3D objekt prikazuje u 2D ravni
- ♦ **osnovne projekcije**:
 - **ortografska projekcija** – transformacija pomoću paralelnih zraka
 - **perspektivna projekcija** – uzima u obzir i perspektivu (u daljini su predmeti manji)

4. ISCRTAVANJE VIRTUALNE SCENE

4.1 ŠTO JE ISCRTAVANJE?

- ◆ skup postupaka kojima se iz opisa virtualne scene proizvodi slika
- ◆ složen postupak koji uključuje korištenje raznih tehnika
- ◆ iscrtavanje u stvarnom vremenu: 30 slika u sekundi (33 ms po slici)
- ◆ off-line iscrtavanje: po nekoliko sati
- ◆ grafički protočni sustav u stvarnom vremenu na čijem je ulazu opis virtualne scene, a na izlazu slika
- ◆ osnovne faze:
 - aplikacijska faza
 - geometrijska faza
 - faza rasteriziranja

4.2 PRAĆENJE ZRAKE

- ◆ klasična i vrlo široko upotrebljavana metoda iscrtavanja
- ◆ izvrsno prikazuje refleksije, oštre sjene i prozirnost – slike "previše" realistične
- ◆ za svaku točku zaslona prati se zraka koja kroz tu točku ulazi u scenu te se traži presjek zrake i predmeta u sceni
- ◆ ako presjek postoji, računa se osvjetljenje, zrcaljena zraka i lomljena zraka
- ◆ postupak se rekurzivno ponavlja, doprinosi osvjetljenja zbrajaju se pomnoženi s koeficijentima zrcalnog odbijanja
- ◆ rezultat je boja točke na zaslonu
- ◆ zraku definiraju dvije točke: oko promatrača kao početna točka i piksel na zaslonu kao krajnja točka – vektor
- ◆ rekurzija se zaustavlja nakon fiksnog broja ponavljanja ili kada doprinos zrake padne ispod određenog praga
- ◆ problem traženja presjeka – nema opće formule
- ◆ određivanje intenziteta piksela – npr. Phongov model
- ◆ zrake za ispitivanje sjene – šalje se zraka od mjesta presjeka do izvora svjetlosti – ako se zraka siječe s neprozirnim predmetom, lokalni doprinos osvjetljenja je nula – praktično jer ne povećava složenost implementacije
- ◆ odbijena zraka računa se zrcaljenjem oko normale na površinu, a lomljena zraka preko Snellovog zakona

4.3 GRAFIČKI PROTOČNI SUSTAV U STVARNOM VREMENU

- ◆ niz funkcija koje se izvode jedna za drugom, a koje virtualnu scenu pretvaraju u sliku
- ◆ funkcije se mogu izvoditi istodobno, kao na pokretnoj traci
- ◆ razlika: funkcijska faza i implementacijska faza

4.3.1 APLIKACIJSKA FAZA

- ◆ ulazna faza u protočni sustav
- ◆ priprema elemenata za iscrtavanje u odgovarajućem obliku
- ◆ operacije vezane uz aplikaciju: logika, simulacija, animacija, ulaz/izlaz, detekcija sudara itd.
- ◆ nema univerzalne implementacije – ne izvodi se sklopovski već se programira – glavni procesor
- ◆ primjer poboljšanja: selektivno odbacivanje trokuta

4.3.2 GEOMETRIJSKA FAZA

- ◆ priprema za popunjavanje točaka na zaslonu
- ◆ ulaz: geometrija sastavljena od 3D trokuta, svjetla, kamera
- ◆ izlaz: 2D trokut u zaslonskim koordinatama i s određenim atributima potrebnim za sjenčanje
- ◆ sklopovska implementacija – grafički procesor
- ◆ **podfaze:**
 - **Transformacija u koordinatni sustav kamere**
 - kamera u ishodištu KS-a
 - gledamo u smjeru z osi, y je gore, a x desno
 - logički: dvije transformacije – globalnom transformacijom vrhovi se iz lokalnog KS-a transformiraju u globalni, a zatim se iz globalnog KS-a u KS kamere transformiraju korištenjem transformacije pogleda
 - rezultat: koordinate svih vrhova izražene u standardiziranom KS-u kamere
 - **Sjenčanje vrhova**
 - **izračun osvjetljenja** (npr. Phongov model)
 - potrebna normala na površini predmeta, parametri materijala, svjetla i položaj kamere
 - jednačbom sjenčanja računa se boja za čitav trokut ili za pojedinačne vrhove
 - ukoliko su boje već zadane, prosljeđuju se fazi rasteriziranja
 - programabilna funkcija
 - može pomicati, brisati i dodavati vrhove
 - **Projekcija**
 - množenjem svih točaka matricom ortogonalne ili perspektivne projekcije koordinate se normaliziraju (svode na interval -1 do 1)
 - projekcijski volumen transformira se u **jediničnu kocku**

- x i y normalizirane projicirane koordinate, z normalizirana dubinska koordinata
- **Obrezivanje**
 - **odbacivanje** trokuta ili dijelova trokuta izvan projekcijskog volumena
 - obrezivanje se vrši u odnosu na jediničnu kocku – jednostavnije nego cijeli volumen
 - osvjetljenje se mora obaviti prije – projekcija deformira 3D prostor, mijenja odnose predmeta i svjetla
- **Preslikavanje na zaslon**
 - jednostavna linearna transformacija kojom se x i y koordinate iz jedinične kocke preslikavaju u koordinate zaslona
 - koordinata z ostaje nepromjenjena

4.3.3 FAZA RASTERIZIRANJA

- ◆ postupak popunjavanja točaka zaslona odgovarajućom bojom
- ◆ potrebno odrediti vidljivost točaka zbog preklapanja
- ◆ dodavanje teksture, prozirnost, antialiasing,...
- ◆ **podfaze:**
 - **Priprema trokuta**
 - priprema potrebnih podataka za prolaz trokuta
 - diferencijali koordinata duž površine trokuta
 - **Prolaz trokuta**
 - utvrditi koje točke zaslona trokut prekriva
 - izračunati vrijednost podataka fragmenta
 - **redak po redak**: na x koordinate rubnih točaka dodaju se njihovi diferencijali čime se dobiva lijevi i desni rub trokuta u novom retku zaslona
 - prolaz točku po točku unutar retka
 - **interpolacija** svih zadanih podataka u vrhovima – nastaje fragment
 - **Sjenčanje**
 - programabilna faza u kojoj se određuje boja pojedine točke trokuta
 - ulaz: podaci fragmenta dobiveni interpolacijom
 - rezultat: boja u točki
 - jedna od tehnika: preslikavanje tekstura
 - kombinacija boje teksture i boje sjenčanja
 - **Stapanje**

- boja se upisuje u spremnik boje (matrica $X \times Y$ gdje su X i Y razlučivosti prozora)
- vektor $[R \ G \ B]$
- izračunata boja točke stapa se s postojećom točkom u spremniku boje
- nije potpuno programabilno, ali na modernom grafičkom sklopovlju moguće je u velikoj mjeri konfigurirati aktiviranjem sklopovski izvedenih matematičkih i logičkih operacija koje se izvode na sadržaju raznih spremnika (Z-spremnik), a nazivamo ih **rasteskim operacijama**
- **maskiranje** – tehnika kod koje oblik iscrtan u zasebnom spremniku (spremniku maske) određuje područje zaslona u kojem se točke is crtavaju, a ostatak je maskiran
- određivanje vidljivosti metodom Z-spremnika
- miješanje slika