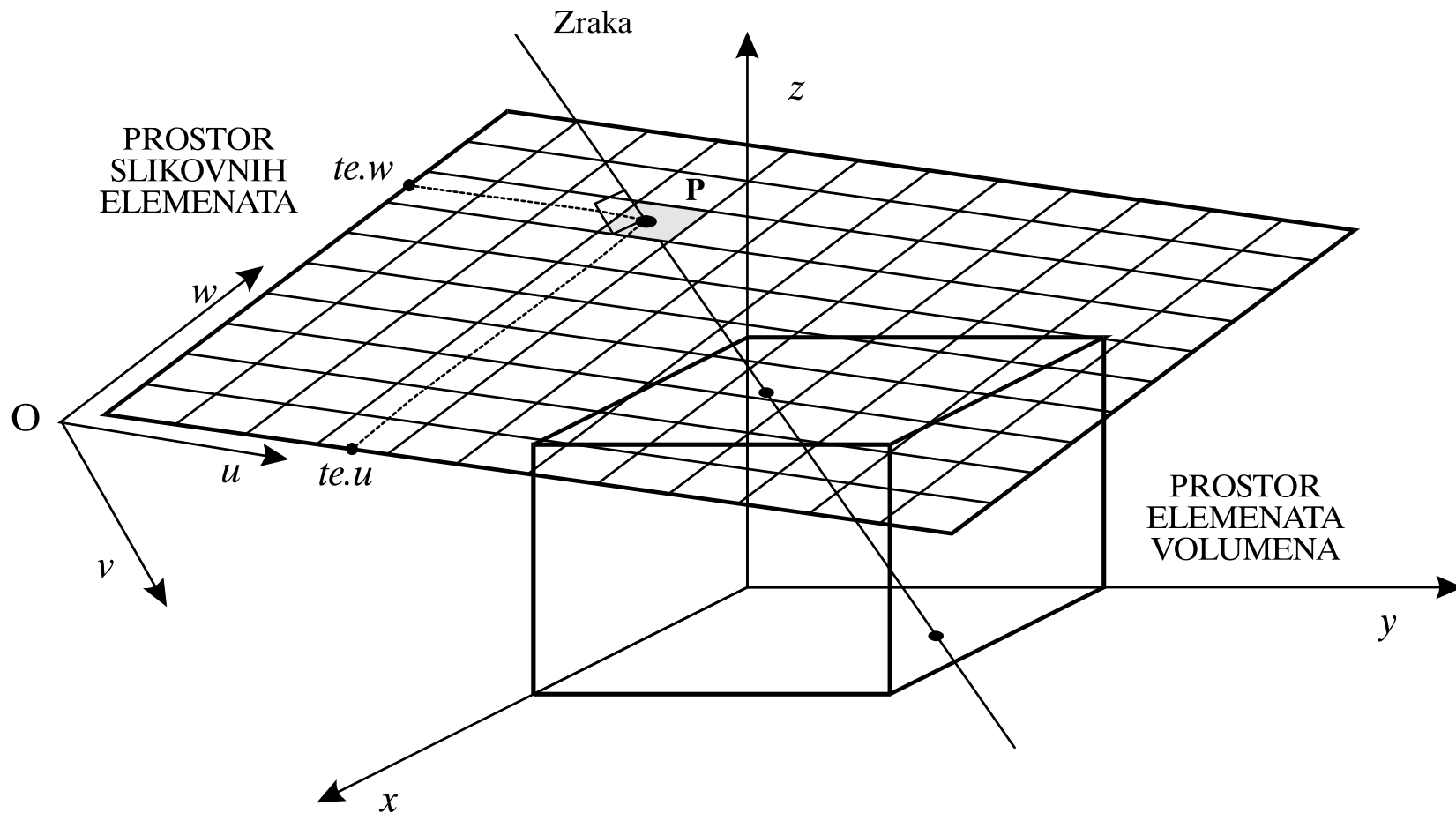


2.3. Postupci prikaza volumena (eng. volume rendering)

- vizualizacija podataka direktno, bez formiranja geometrijskih primitiva
- prikaz volumena bacanjem zrake (ray casting)
 - temelji se na prostoru projekcije, iz slikovnih elemenata u prostor volumnih elemenata se baca zrake (ray casting)
 - zbog redoslijeda iscrtavanja omogućava skrivanje nevidljivih dijelova
 - omogućava vizualizaciju raspršenih podataka (geofizikalnih, meteoroloških i sl.)
- izravno iz prostora elemenata volumena u prostor projekcije
 - projekcija volumnih elemenata (splatting) problem određivanja redoslijeda vidljivosti
 - postupak poravnavanja-vitoperenja (shear warp)
 - postupak preslikavanjem tekstura
- MIP projekcija (maximum intensity projection)
 - cilj je naglasiti područje kojem je pridijeljen maksimalni intenzitet

Prikaz volumena bacanjem zrake (eng. ray casting)

- Levoy 1988, 90
- bacanje zrake u postupku prikaza volumena
 - kroz svaki element slike (iz očišta) zraka se prati u prostor scene (niz zraka)
 - zbog alias artefakata to može biti i više zraka uniformno ili neuniformno
 - simulacije fizikalno temeljene interakcije svjetlosti s površinom objekta
 - 1) određivanje pojedine zrake
 - 2) određivanje probodišta zrake i prostora elemenata volumena
 - 3) određivanje optičke dubine zrake na putu između dva probodišta
- prilikom interakcije zrake svjetlosti (određene valne duljine) kroz poluprozirnu materiju dio svjetlosti se reflektira dio se apsorbira ili raspršuje
- prozirni materijali prigušuju optičku dubinu



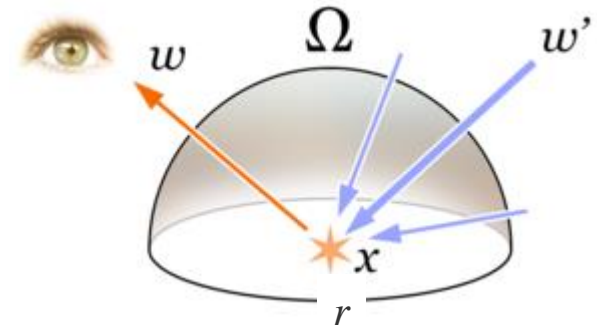
zraka koju određuje slikovni element u prostoru elemenata volumena

Model proračuna intenziteta zrake

- linearna transportna teorija za prijenos čestica u nehomogenom amorfnom mediju
- propuštaju se "virtualne" čestice kroz prostor elemenata volumena
 - fizikalni ili heuristički zakoni (u računarskoj grafici npr. optički zakoni u postupku praćenja zrake)
 - međudjelovanje ->
 - intenzitet u točki, sa smjerom i energijom (bojom)
- proračun intenziteta podešavanjem gustoće emitterskog snopa
- jednačba ostvarivanja prikaza - J. Kajiya (rendering equation)
- model simulacije propagacije svjetlosti kroz prostor elemenata volumena
- jednačba stacionarne transportne teorije
- http://www.cg.in.tum.de/fileadmin/user_upload/Lehrstuehle/Lehrstuhl_XV/Teaching/Applets/applets/vis/volume_rendering/demo.html

- jednađba ostvarivanja prikaza - J. Kajiya (rendering equation)
 - ako u jednađbi pretpostavimo da nema djelomično prozirnih materijala:

$$L(r, \vec{\omega}) = L_B(r, \vec{\omega}) + \int_{\Omega} f_{BDRF}(r, \vec{\omega}' \rightarrow \vec{\omega}) L_i(r, \vec{\omega}') (\vec{\omega}' \cdot \vec{n}) d\omega'$$



| | |
|---|--|
| $L(r, \vec{\omega})$ | sjajnost – broj fotona (gustoća toka) po jedinici površine za smjer ω i za točku r reflektirana svjetlost na poziciji r u smjeru ω , (za neki trenutak t i valnu duljinu λ) |
| $L_B(r, \vec{\omega})$ | emitirana svjetlost na poziciji r u smjeru ω , L_i dolazna svjetlost |
| $\int_{\Omega} \dots d\omega'$ | integral upadnih zraka svjetlosti preko površine polukugle, |
| $f_{BDRF}(r, \vec{\omega}' \rightarrow \vec{\omega})$ | mjera reflektirane svjetlosti na poziciji r , prema izlaznom smjeru ω po funkciji $f(\text{BRDF})$ |
| $(\vec{\omega}' \cdot \vec{n})$ | atenuacija upadnog svjetla obzirom na kut upada prema normali n na površinu (u nekim interpretacijama ovaj član je uključen u f) |

- aproksimacija fizikalnog modela proračuna propagacije svjetlosti temeljena na transportnoj teoriji

$$I(t_0, \vec{\omega}) = \int_{t_0}^{\infty} Q(t) e^{-\int_{t_0}^t \sigma_{sc}(t') + \sigma_a(t') dt'} dt$$

gubitak svjetlosti raspršenjem gubitak svjetlosti apsorpcijom

doprinos svjetlosti unutarnjim raspršenjem doprinos svjetlosti emisijom

$$Q(t) = \sigma_{sc}(t) \int_{4\pi} \rho_{sc}(\vec{\omega}' \rightarrow \vec{\omega}) I(t, \vec{\omega}') d\vec{\omega}' + E(t)$$

- $I(t_0, \omega)$ intenzitet svjetlosti, t_0 pozicija duž zrake koju promatramo, ω smjer zrake
- σ_a , σ_{sc} apsorbirana svjetlost %, raspršena svjetlost u drugom smjeru (*scattered, albedo*)
- $Q(t)$ – doprinos u volumenu na mjestu t , $E(t)$ – emisija na mjestu t ,
- $\rho_{sc}(\omega' \rightarrow \omega)$ – refleksija (%) u smjeru ω od svjetlosti koja dolazi iz smjera ω' ,
- vjerojatnost da foton koji se giba u smjeru ω' bude raspršen u smjer ω 2 - 6

- jednađzba ostvarivanja prikaza - J. Kajiya (*rendering equation*)
 - ako u jednađzbi dominantno promatramo prigušenje zbog (ne)prozirnosti materijala gdje je raspršenje malo (smog):

$$I(t_0, \vec{\omega}) \approx \int_{t_0}^{\infty} Q(t) e^{-\int_{t_0}^t \sigma_a(t') dt'}$$

$$I(t_0, \vec{\omega}) \approx \sum_{i=0}^{n-1} e^{-\sum_{j=0}^{i-1} \sigma_j \Delta x} Q_i \Delta x = \sum_{j=0}^{n-1} Q_j \Delta x \prod_{j=0}^{i-1} e^{-\sigma_j \Delta x}$$

$$\alpha_i \equiv 1 - e^{-\sigma_{a_i} \Delta x}$$

neprozirnost - prigušenje,

$$Q_i \quad C_i \equiv (g_i / \alpha_i) \Delta x$$

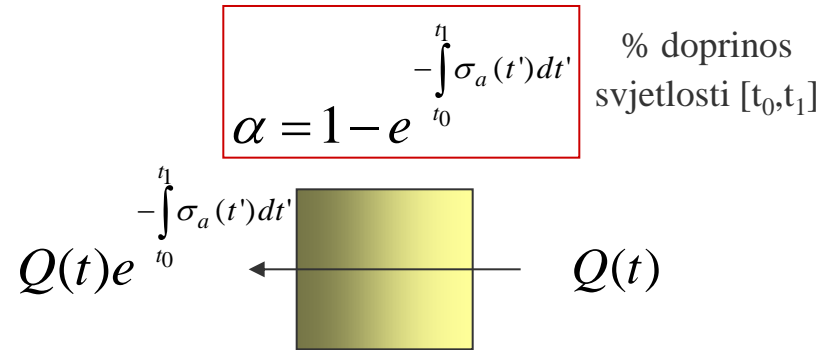
boja uzorka,

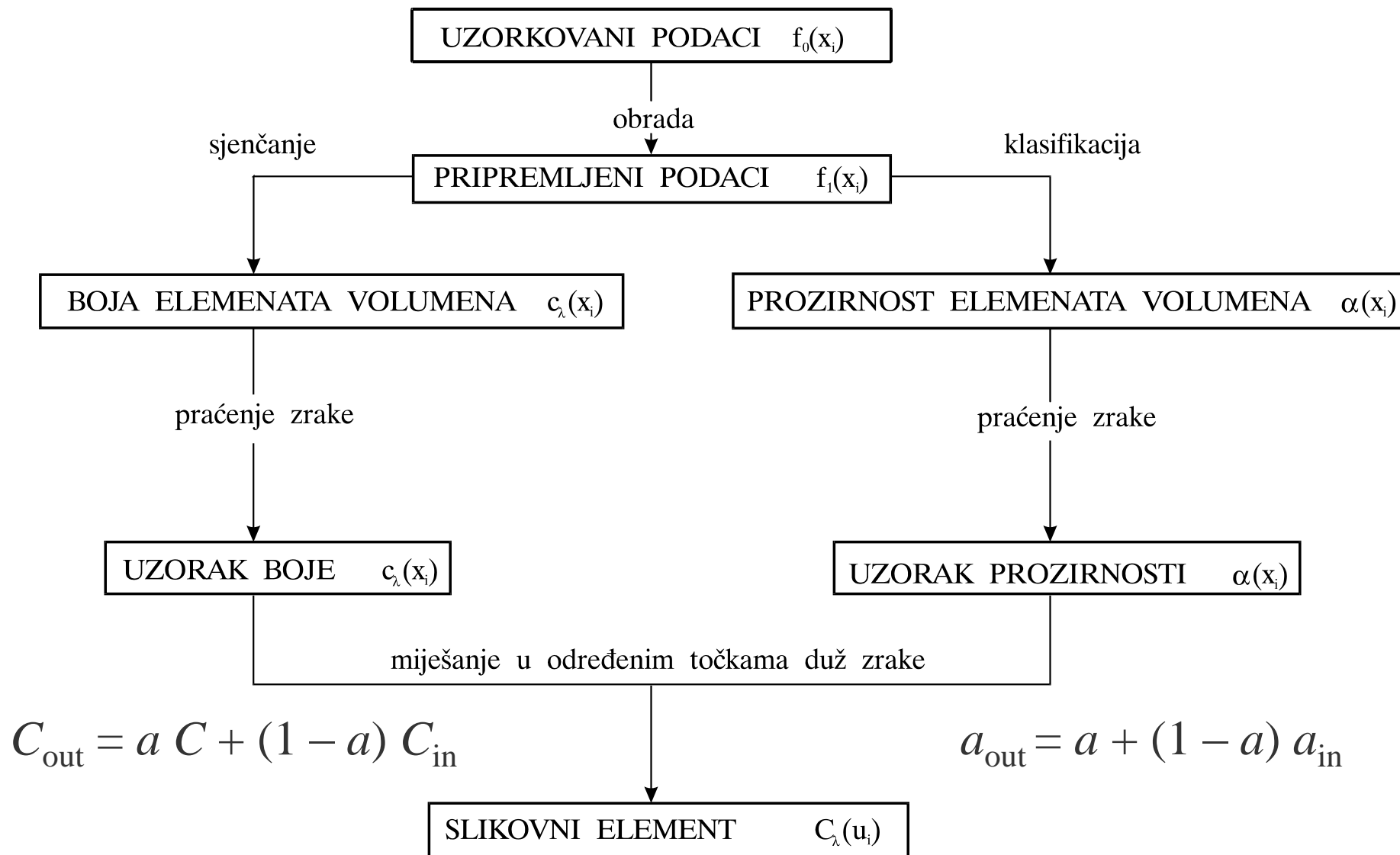
$$c_i \equiv C_i \alpha_i$$

umnožak boje i neprozirnosti.

$$I(x) = \sum_{i=0}^{n-1} c_i \prod_{j=0}^{i-1} (1 - \alpha_j)$$

$$= c_0 + c_1(1 - \alpha_0) + c_2(1 - \alpha_0)(1 - \alpha_1) + \dots + c_{n-1}(1 - \alpha_0) \dots (1 - \alpha_{n-2})$$

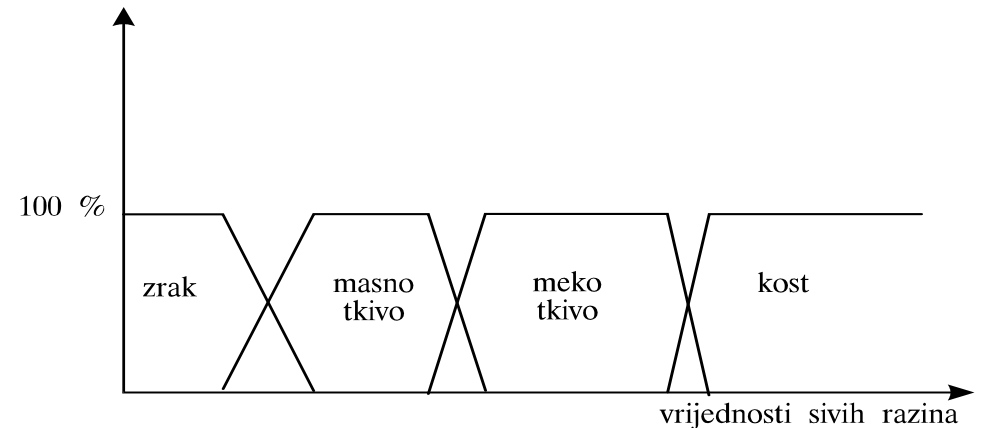
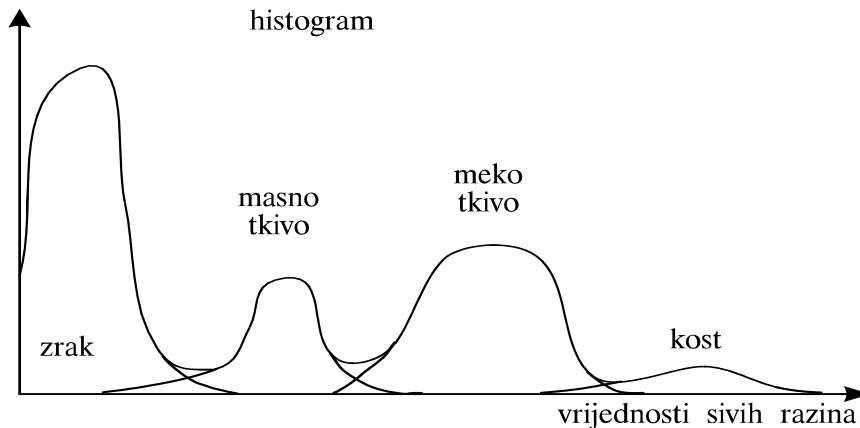




Klasifikacija vrijednosti volumnih elemenata

- histogram – vrijednosti sivih razina - frekvencija pojavljivanja
- definiranje prijenosne funkcije – pridružuju se prozirnosti tkivima i boje
 - različita funkcija pridruživanja za boju i za prozirnost
 - nezavisno izračunavanje normala, boja, prozirnosti (manje nakupljanje greške)
- binarna klasifikacija ili neizrazita funkcija pridruživanja (fuzzy)
- moguća je pojava kontakta kosti i zraka (npr. zubi, hrskavica nosa) – koriste se više-dimenzijske prijenosne funkcije

Voreen



- BTF (Back to front)

- operator Over

$$C_{\text{out}} = \alpha C + (1 - \alpha) C_{\text{in}}$$

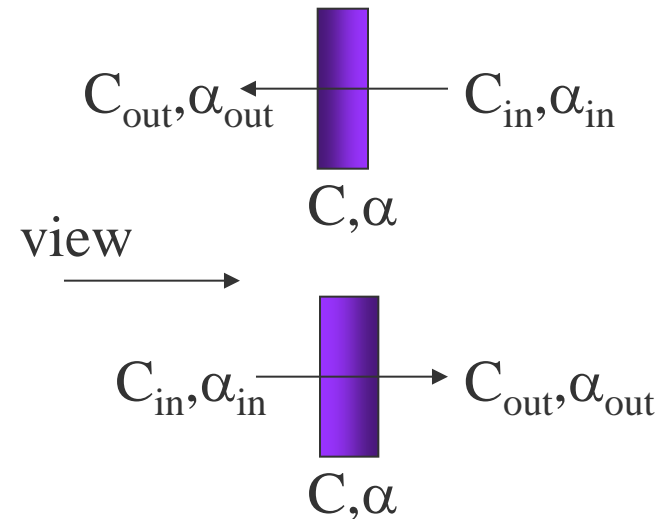
$$\alpha_{\text{out}} = \alpha + (1 - \alpha) \alpha_{\text{in}}$$

- FTB (Front to back)

- operator Under

$$C_{\text{out}} = \alpha_{\text{in}} C_{\text{in}} + (1 - \alpha_{\text{in}}) C$$

$$\alpha_{\text{out}} = \alpha_{\text{in}} + (1 - \alpha_{\text{in}}) \alpha$$

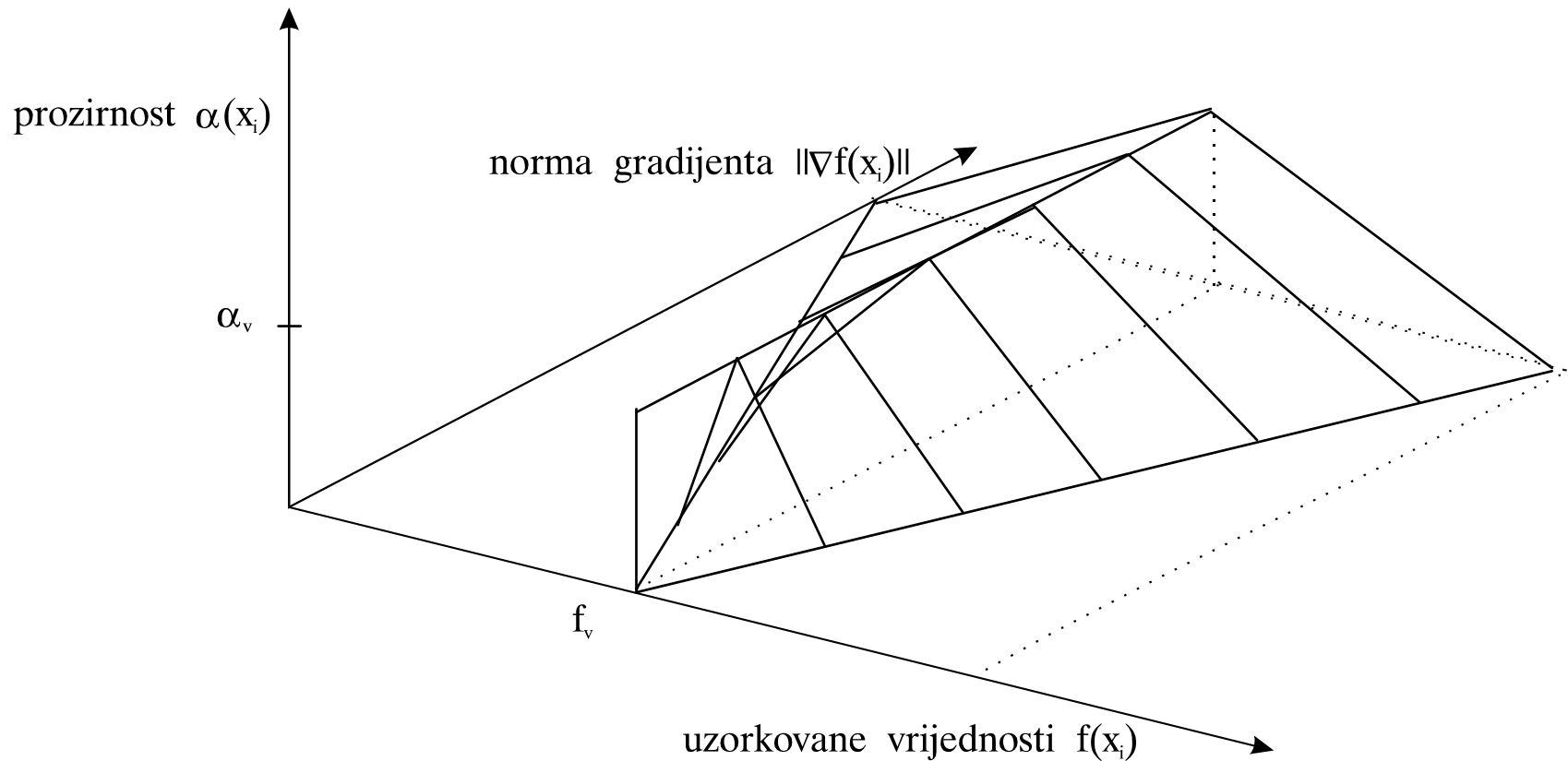


ODREĐIVANJE BOJE

- Phong-ov model sjenčanja uz upotrebu lokalnog gradijenta

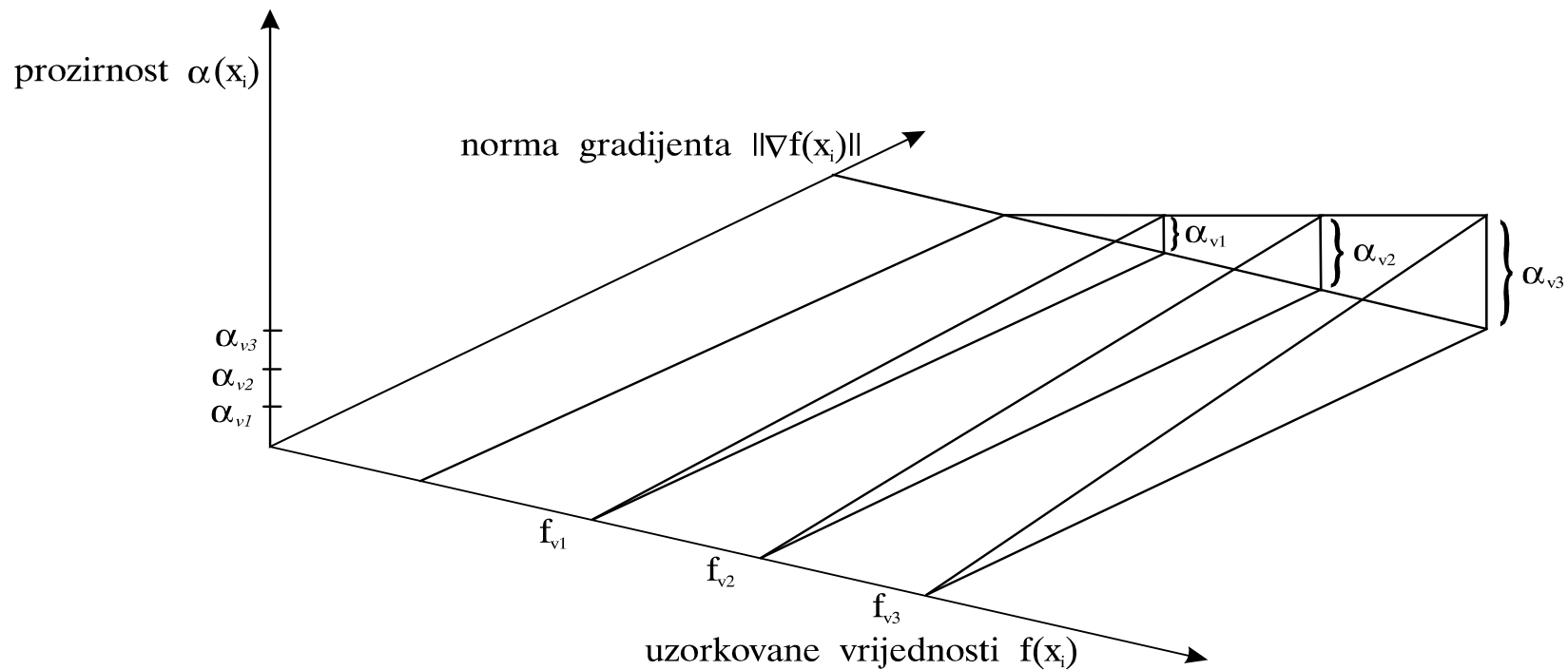
ODREĐIVANJE PROZIRNOSTI

- naglašavanje graničnog sloja
- ovisnost o iznosu lokalnog gradijenta



Pridruživanje koeficijenta prozirnosti ovisno o veličini diskontinuiteta i vrijednosti elemenata volumena $f(x_i)$

Za vrijednost f_v neprozirnost je maksimalna, ako je gradijent mali znači da smo u homogenom tkivu - nismo na granici različitih tkiva, što je veći iznos gradijenta šire je područje utjecaja neprozirnosti u susjednim vrijednostima elemenata volumena

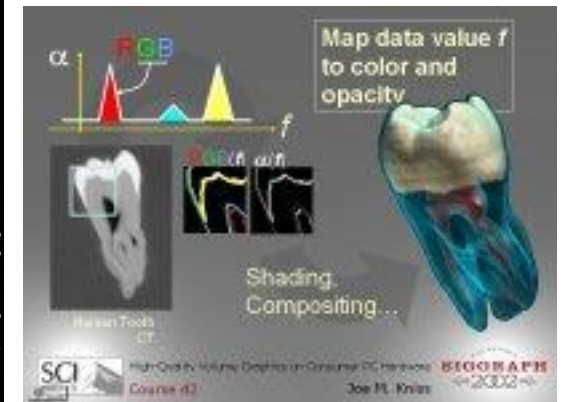
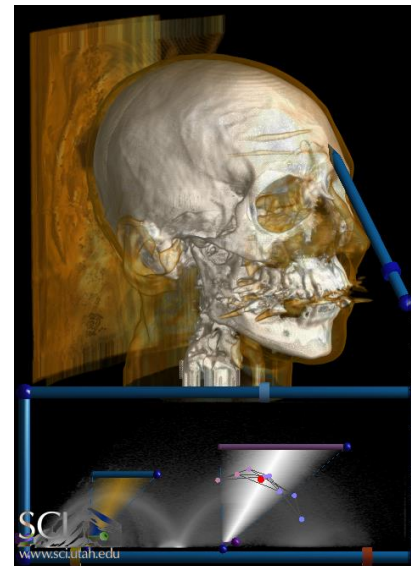
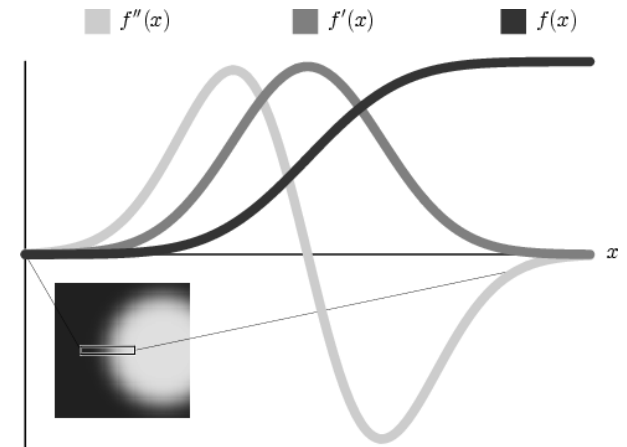


Određivanje koeficijenata $\alpha(x_i)$ na osnovu tri sloja određena s f_{v1} , f_{v2} , f_{v3} .

Više-dimenzijske prijenosne funkcije

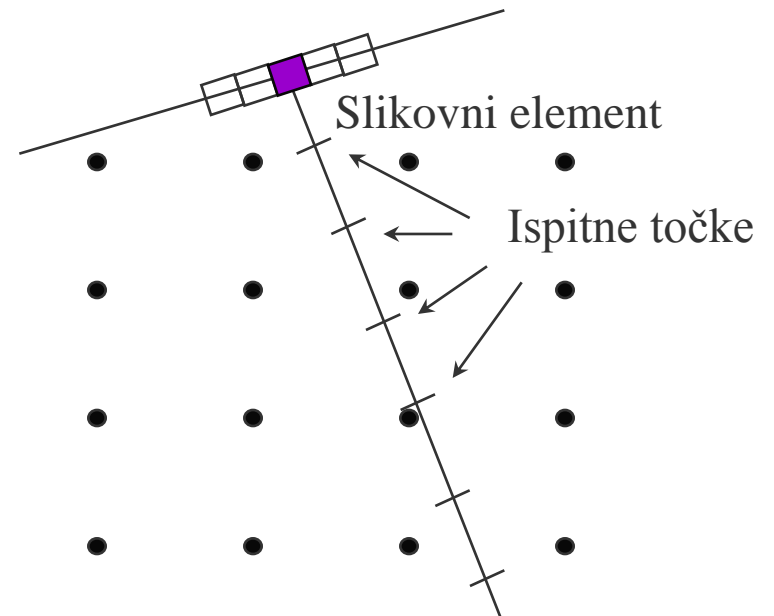
(Kniss, Kindlmann, Hansen)

- prijenosnu funkciju definiramo u više dimenzijskom prostoru
 - prva derivacija – velika promjena u tkivima



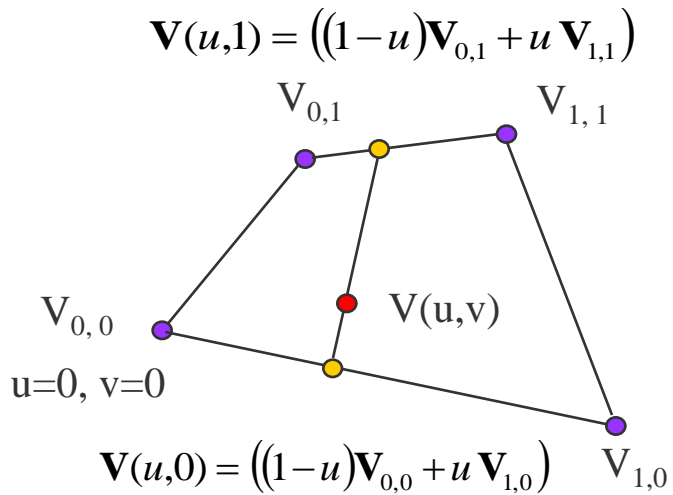
Postupak rekonstrukcija vrijednosti u ispitnim točkama

- zraka kroz prostor elemenata volumena
 - u ispitnim točkama potrebno je načiniti rekonstrukciju
 - rezultat doprinosa pojedinih ispitnih točaka određuje slikovni element
-
- određivanje vrijednosti u ispitnim točkama
 - korištenje najbližeg susjeda (0-tog reda)
 - linearna interpolacija (1-vog reda) na osnovi 8 susjeda -> trilinearna interpolacija
 - kvadratna, kubna (viši stupanj)



BILINEARNA INTERPOLACIJA

- parametarska jednačba kroz četiri točke



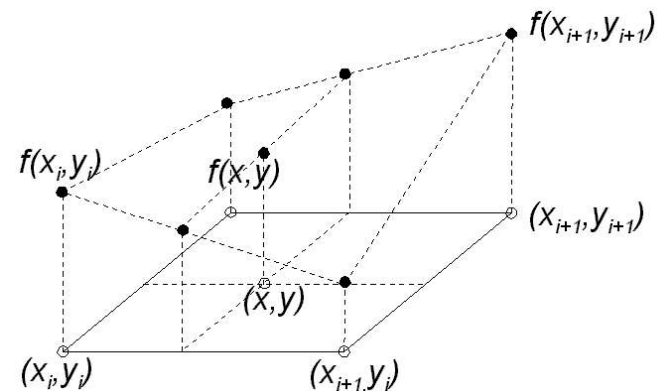
$$\mathbf{V}(u, v) = \mathbf{V}_{u,0} (1-v) + \mathbf{V}_{u,1} v$$

$$\mathbf{V}(u, v) = ((1-u)\mathbf{V}_{0,0} + u\mathbf{V}_{1,0}) (1-v) + ((1-u)\mathbf{V}_{0,1} + u\mathbf{V}_{1,1}) v$$

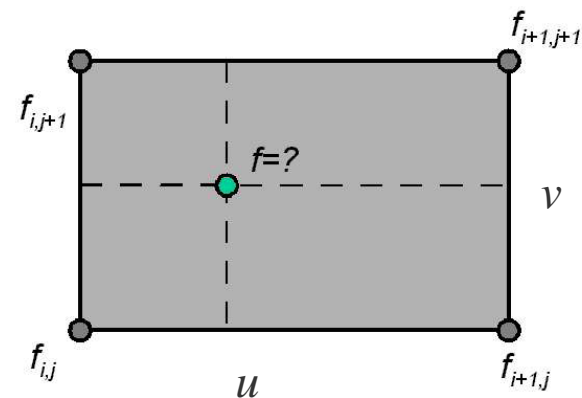
$$\mathbf{V}(u, v) = (1-u)(1-v)\mathbf{V}_{0,0} + u(1-v)\mathbf{V}_{1,0} + (1-u)v\mathbf{V}_{0,1} + uv\mathbf{V}_{1,1}$$

BILINEARNA INTERPOLACIJA

- bilinearna interpolacija *nije* linearna (nije ravnina)



$$\mathbf{V}(u, v) = (1-u)(1-v)\mathbf{V}_{0,0} + u(1-v)\mathbf{V}_{1,0} + (1-u)v\mathbf{V}_{0,1} + uv\mathbf{V}_{1,1}$$

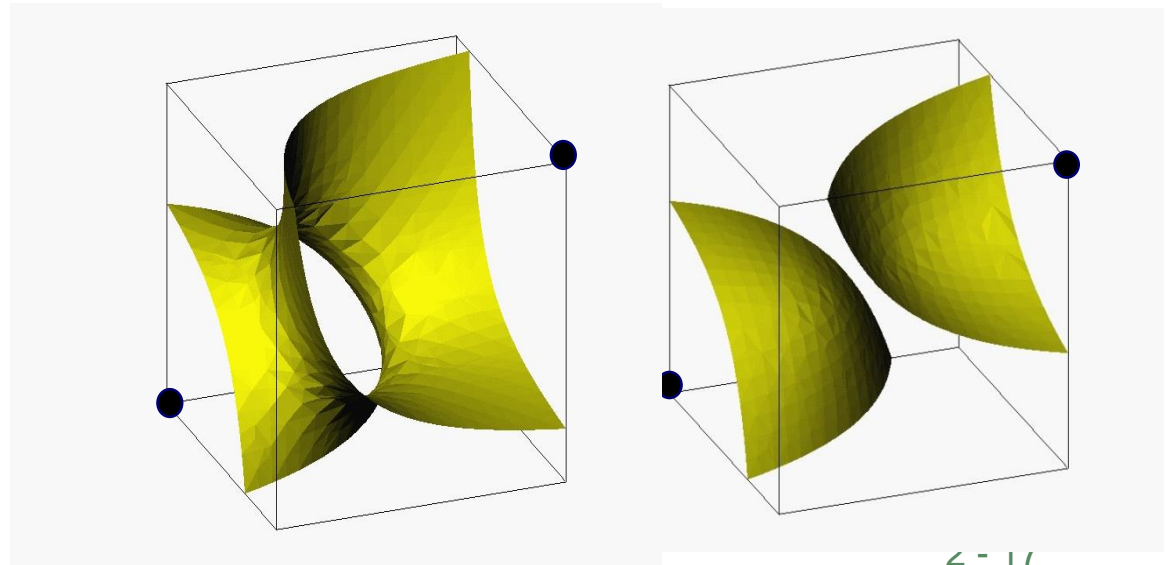
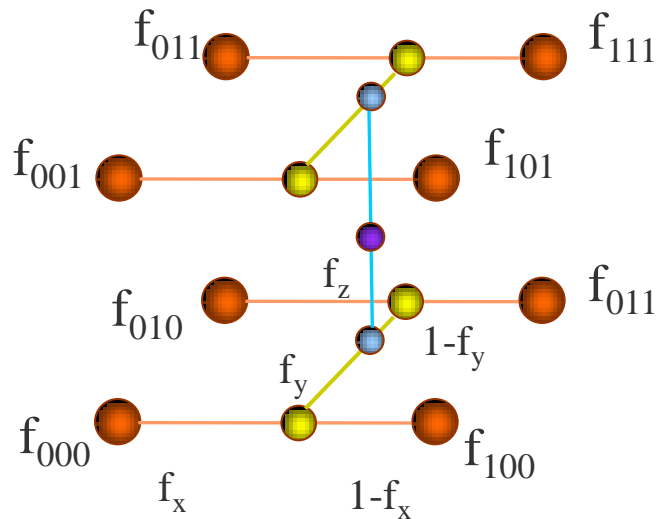


$$u = \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i}, \quad v = \frac{y - y_i}{y_{i+1} - y_i}$$

TRILINEARNA INTERPOLACIJA

- određivanje vrijednosti u ispitnim točkama na osnovi trilinearne interpolacije
- trilinearna interpolacija proširenje bilinearne
- površina dobivena trilinearnom interpolacijom je kubna (možemo primijeniti i kod postupka pokretne kocke)

$$f(x, y, z) = f_{000}(1-x)(1-y)(1-z) + f_{100}x(1-y)(1-z) + f_{010}(1-x)y(1-z) + f_{001}(1-x)(1-y)z + f_{110}xy(1-z) + f_{101}x(1-y)z + f_{011}(1-x)yz + f_{111}xyz$$

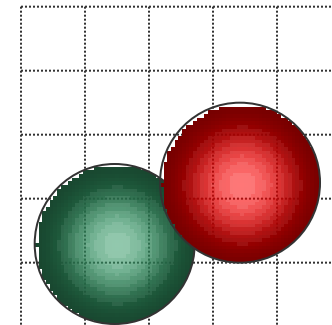
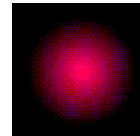
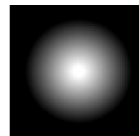


Određivanje intenziteta zrake

- određivanje ispitnih točaka na zraci
- jednoliko raspoređene točke na osnovi Bresenham-ovog algoritma
- trilinearna interpolacija između osam vrhova (elemenata volumena) koji okružuju ispitnu točku (posebno za intenzitet i prozirnost)
- gustoća ispitnih točaka
- intenzitet zrake - iterativni postupak za određivanje I_{out} na osnovi I_{in} i prozirnosti α_{out} na osnovi α_{in} .
- kada α_{out} dosegne vrijednost jedan postupak se zaustavlja (ušteda vremena)

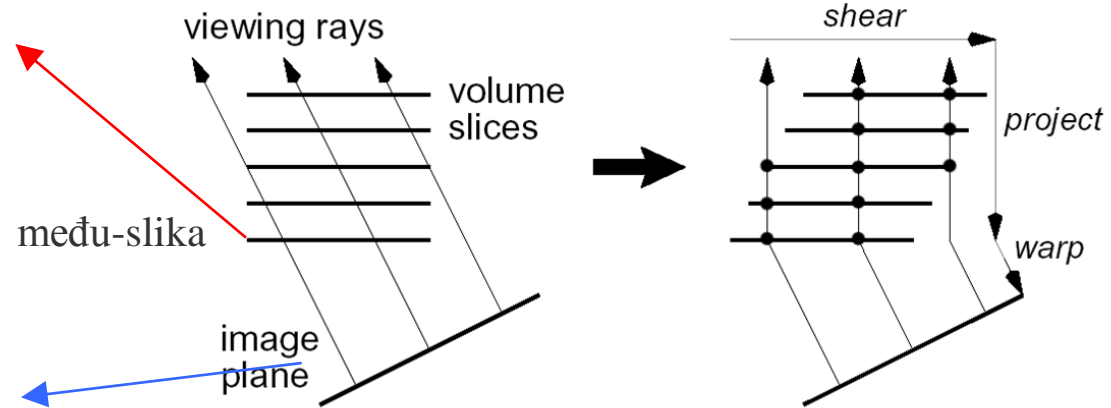
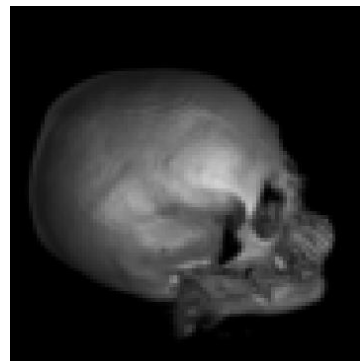
Projekcija volumnih elemenata (Splatting)

- L. Westover '90 <http://potree.org/demo/pompei/pompei.html>
- svaki volumni element se projicira na ravninu projekcije,
- važno je poštivati redoslijed (udaljenost) BTF ili FTB
- u projekciji pojedinoj točki pridružuje se otisak (2D *footprint*), jezgra (*kernel*) je obično Gaussova funkcija koja odgovara projekciji kuglice (kod perspektivne projekcije je elipsoid)
- rezultat se stapa - akumulira u ravnini projekcije (frame buffer)
 - posebno za prozornost, posebno za boju
- nedostatak – ako su jezgre premale javljaju se šupljine na slici, ako su prevelike slika je zamagljena (blur), pojava “preskakanja svjetline” kod kuta od 45°



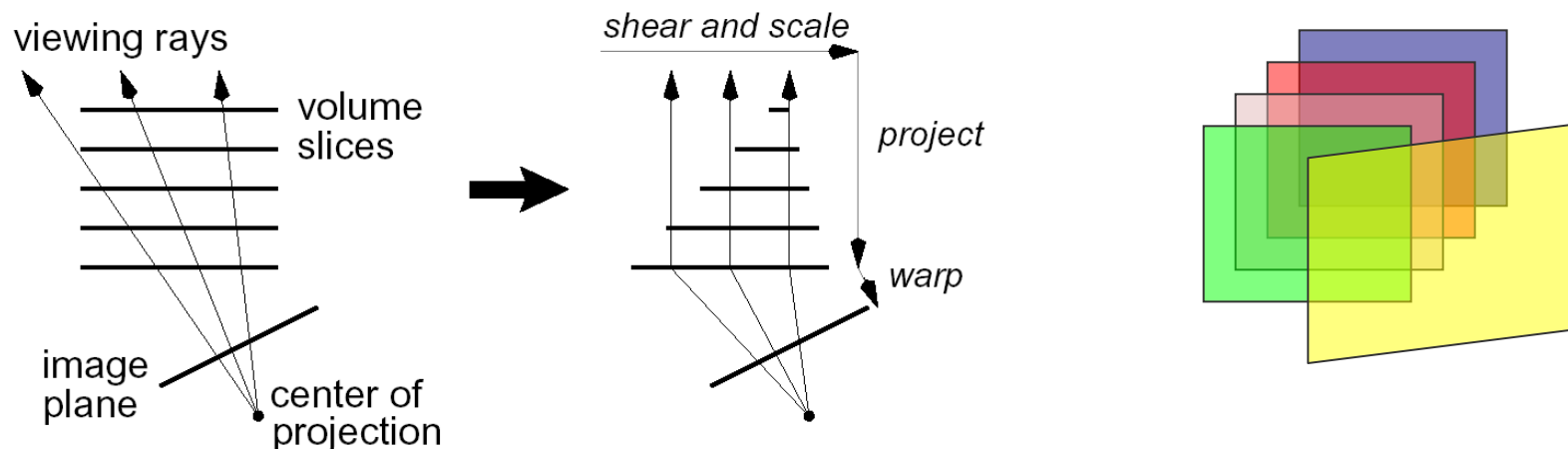
Postupak poravnavanja-vitoperenja (*Shear warp*)

- Lacroute and Levoy '94, Cameron and Unrill
- u volumenu se prvo poravnaju pojedini slojevi tako da zrake projekcije budu paralelne, u ovom postupkom potrebno je uzrokovanje (re-sampling) u osnovnim volumnim podacima kako bi se slojevi poravnali (alias)
- među-slika je izvitoperena – kao tkanina koju dijagonalno rastegnemo
- VolPack (<http://www-graphics.stanford.edu/software/volpack/>)



Postupak poravnavanja-vitoperenja (Shear warp)

- volumni podaci se projiciraju na među-sliku i vitoperenjem se ostvaruje konačna slike
 - poravnavanje za paralelnu projekciju i perspektivnu projekciju
- ideja postupaka bacanja zrake bitno se ubrzava zbog načina dohvata podataka iz memorije
- akumulacija rezultata (prozirnosti) u ravnini projekcije
- nedostatak – ako promijenimo transfer funkciju – nanovo se računa volumen
 - poravnati volumeni se unaprijed izračunavaju – potrebna memorija (trostruko)
 - artefakti blizu kuta 45° , među slika degenerira u romb u kojem je značajno smanjen broj uzoraka za fazu vitoperenja

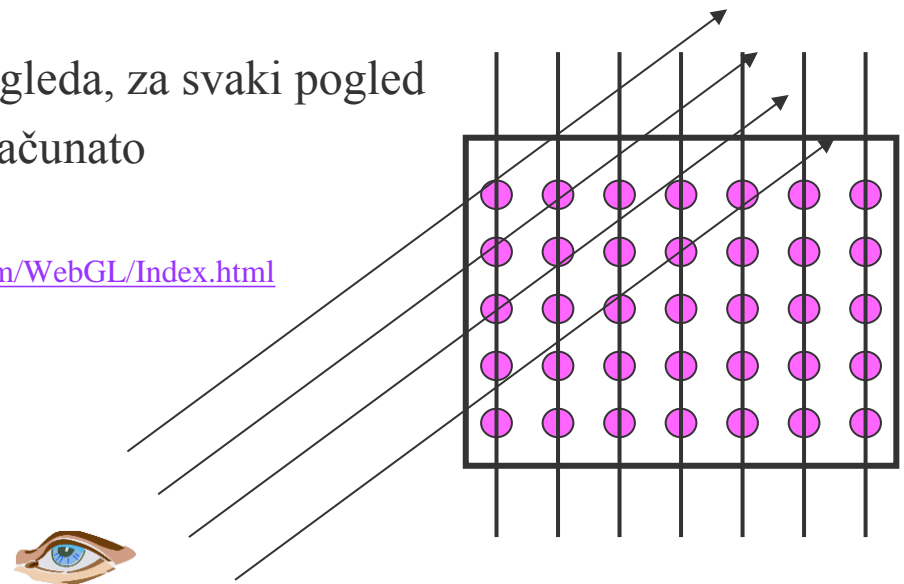
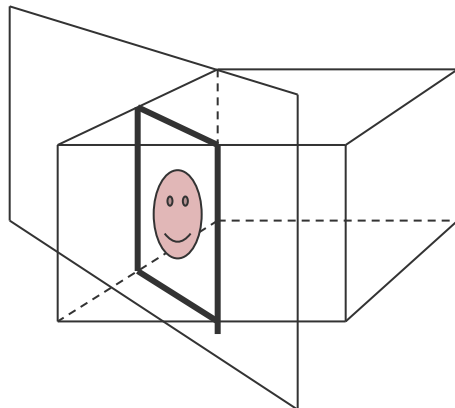


Postupak preslikavanjem tekstura 2D

- uz određeni redoslijed BTF (back to front) pojedini slojevi preslikavaju se kao teksture na ravninu projekcije i akumulira rezultat
- ako se pogled poravna s poretkom tekstura (u primjeru vertikalno) ne bi vidjelo ništa, pa se zato promijeni organizacija orijentacija tekstura
- čuvaju se tri kopije podataka – poravnate s xy, xz i yz koordinatnim ravninama a ovisno o poziciji promatrača odabire se ona koja se najbolje vidi
- problem “iskakanja” pri prijelazu kuta 45°

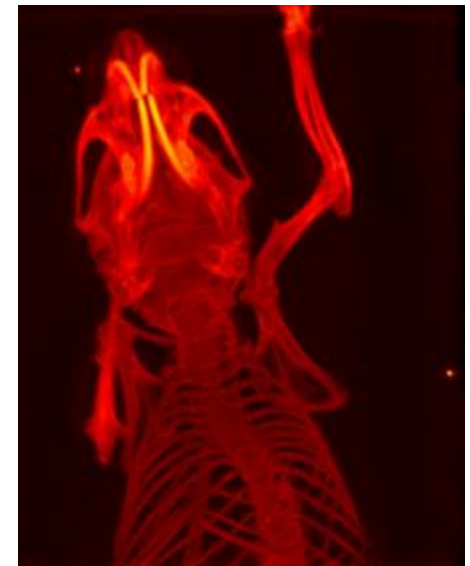
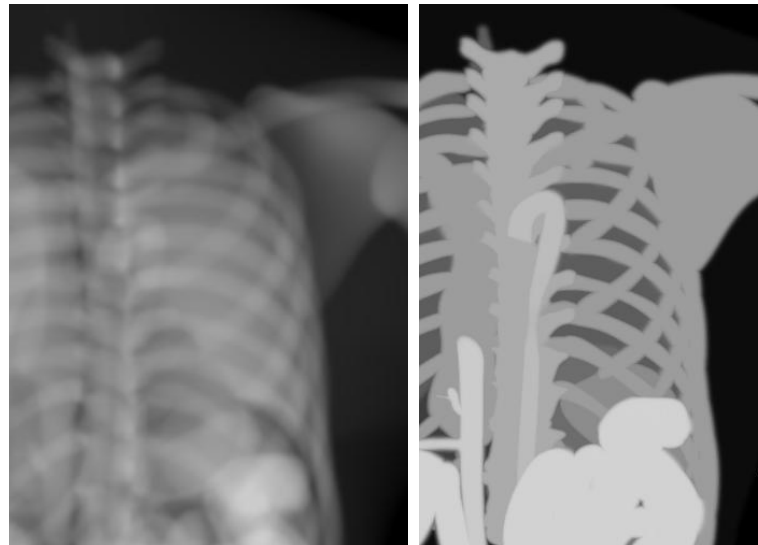
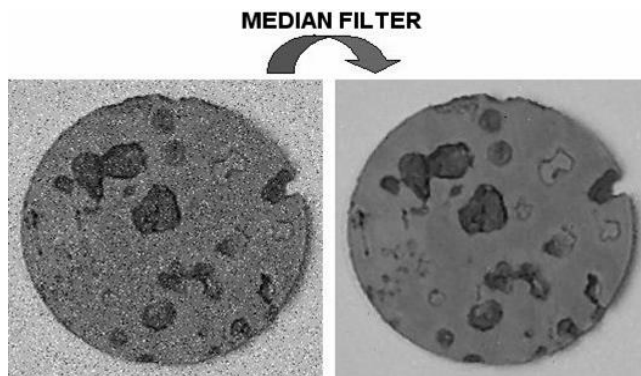
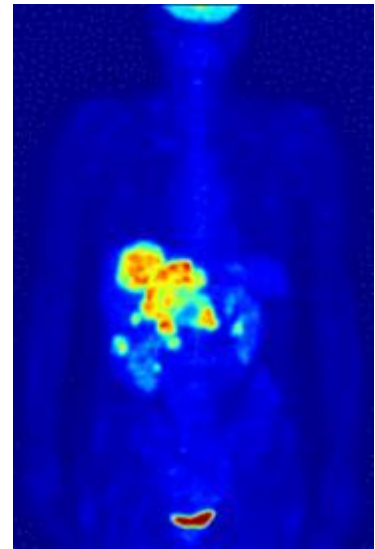
3D preslikavanje teksture

- određivanje tekstura okomito na smjer pogleda, za svaki pogled
- klasifikacija i osvjetljenje je unaprijed izračunato
- sklopovski podržano GPU
- <http://www.iamnop.com/volumetric/> <http://www.lebarba.com/WebGL/Index.html>



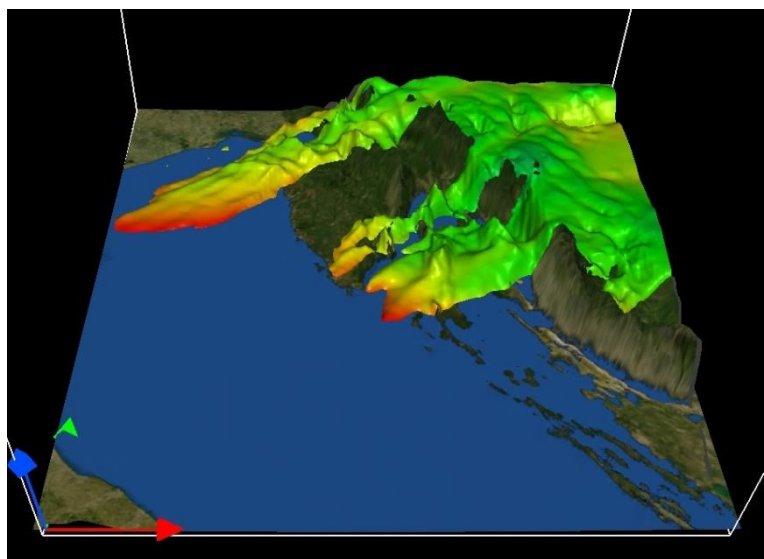
MIP projekcija (Maximum Intensity Projection)

- definiramo transfer funkciju tako da naglasimo područje od posebnog interesa
- simulacija prolaska x-zraka, redoslijed (udaljenost) pri projekciji nije bitna pa se znatno pojednostavnjuje postupak prikaza
- prijenosna funkcija u sebi implicitno sadržava segmentaciju – raspoznavanja uzoraka i obrada slike
- šum je poželjno prije ukloniti

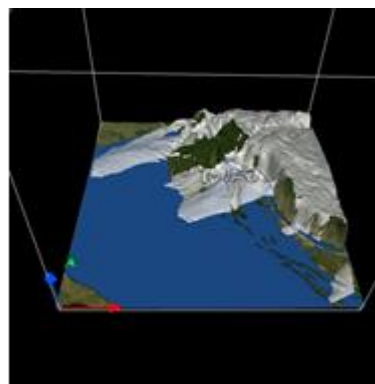
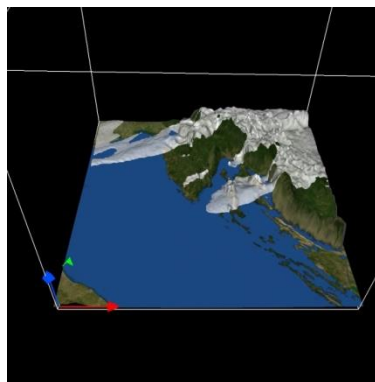


Primjer vizualizacije meteoroloških podataka (programski alat Vapor):

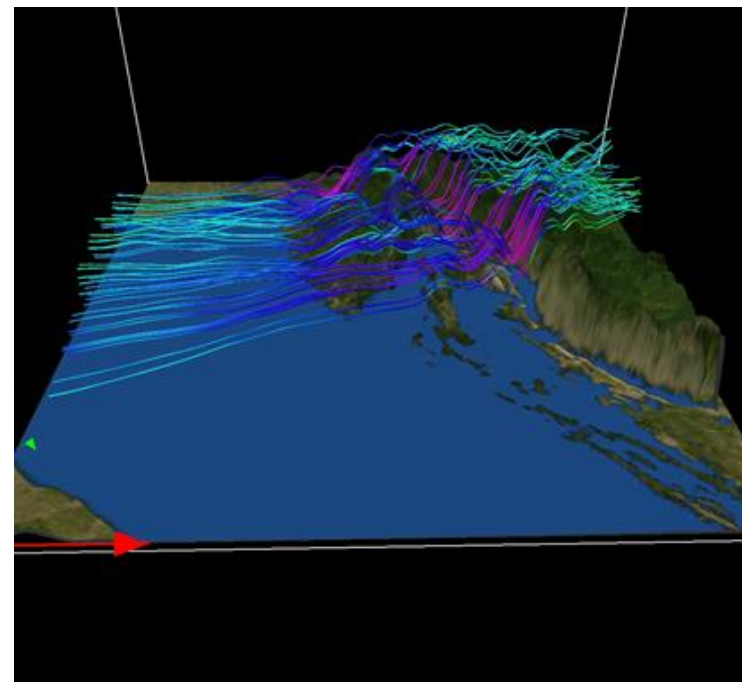
- podaci o vlazi, temperaturi, brzini vjetra, talku, vrijeme.



Izo-površina – vodena para.
Temperatura - boja.



Vrijeme = 0-24
(animacija).



Prikaz vjetra koristeći stalan tok.
Jačina vjetra – boja
(ljubičasto je najveća snaga).

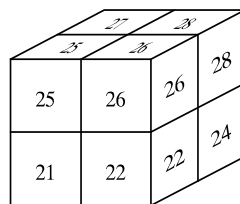
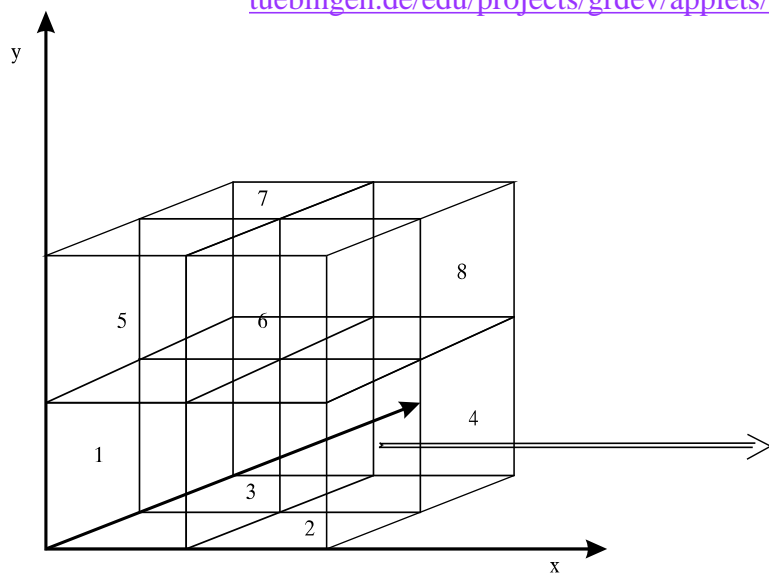
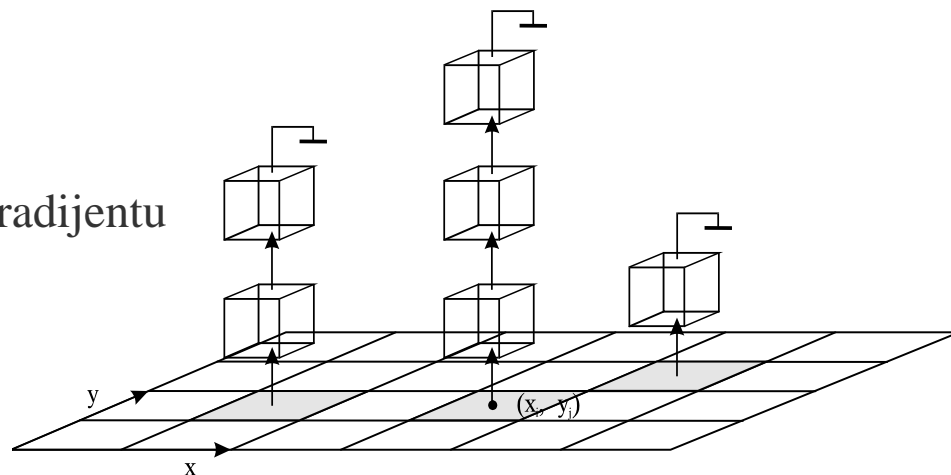
ORGANIZACIJA PODATAKA

- često slabo popunjen prostor
- zasebno se pohranjuju podaci o lokalnom gradijentu

- ŠTAPIĆASTA REPREZENTACIJA

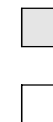
- OKTALNO STABLO

- (http://www.gris.uni-tuebingen.de/edu/projects/grdev/applets/smart/html/index_en.html)
- (http://www.gris.uni-tuebingen.de/edu/projects/grdev/applets/octree/html/index_en.html)



| | | | | | |
|----|-----|-----|----|-----|-----|
| 33 | 343 | 344 | 43 | 443 | 444 |
| | 341 | 342 | | 441 | 442 |
| 31 | 32 | | 41 | 423 | 424 |
| | | | | 421 | 422 |
| 13 | 14 | | 2 | | |
| | 123 | 124 | | | |
| 11 | 121 | 122 | | | |

Zraka



Puno polje

Prazno polje

2.4 Postupci temeljeni na transformiranom prostoru objekta

- korištenje frekvencijske domene
 - načinimo Fourierovu transformaciju volumena
 - u frekvencijskom području presiječemo volumen ravninom koja prolazi ishodištem
 - inverznom Fourierovom transformacijom vratimo rezultat u prostorno područje
 - Direktna diskretna Fourierova transformacija 1D:

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)W_N^{kn}, \quad W_N = e^{-i2\pi/N}, \quad k = 0, \dots, N-1$$

- Inverzna Fourierova transformacija: <http://rsb.info.nih.gov/ij/signed-applet/> (File OpenSamples ProcessFFT)

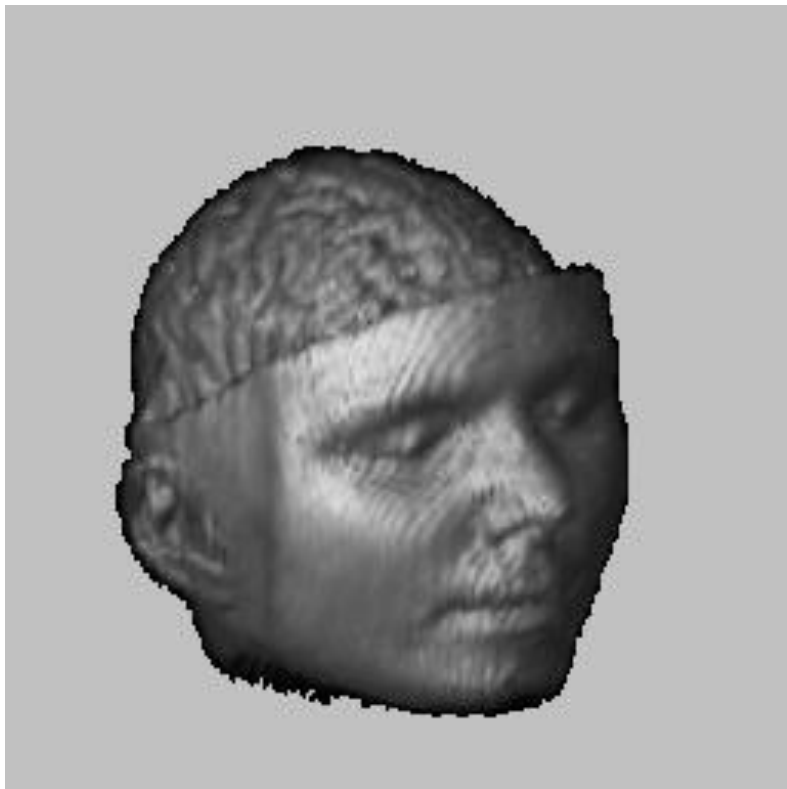
$$f(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} F(n)W_N^{-kn}$$

- Amplituda (magnituda), faza

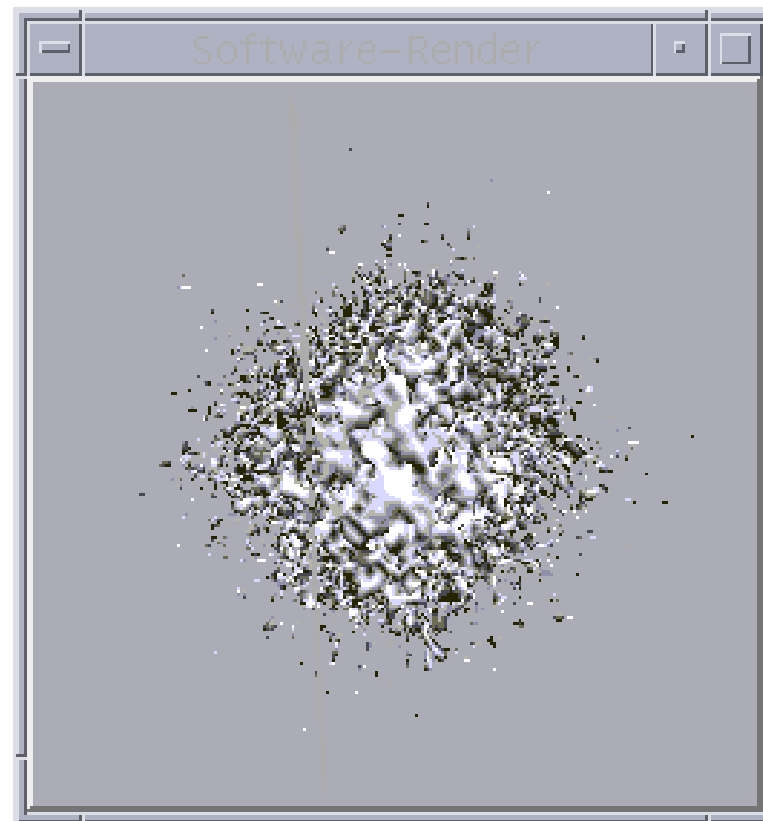
$$|F(k)| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad a \text{ je realni, } b \text{ imaginarni dio}$$

$$\Phi(F(k)) = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$$

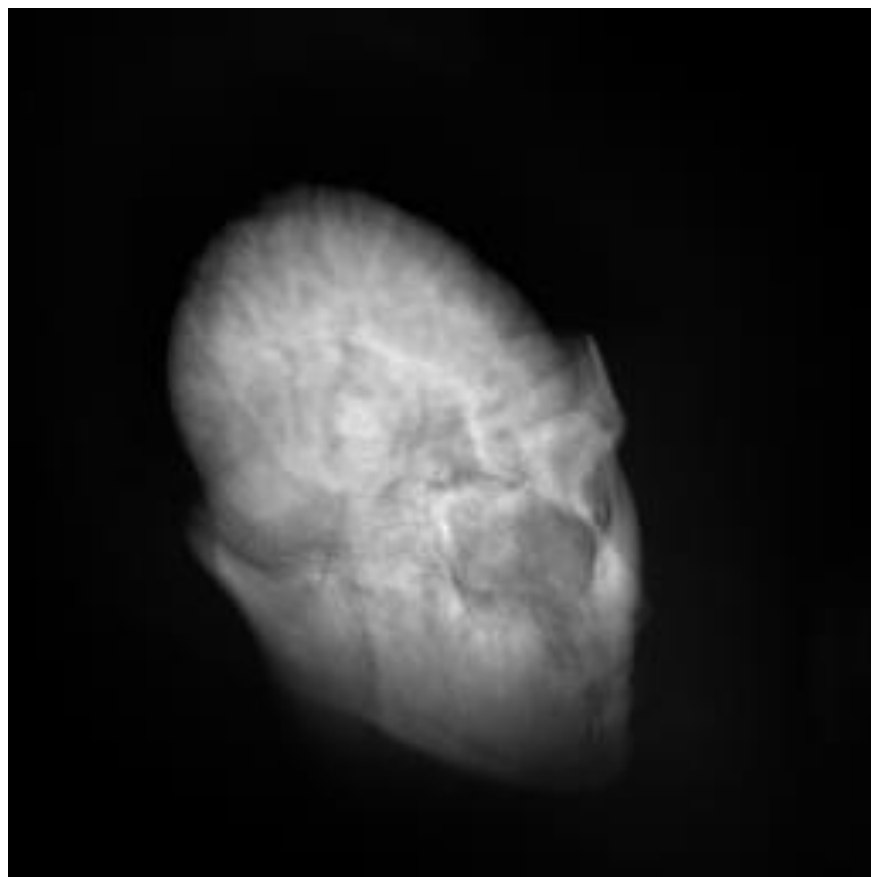
- korištenje domene valića (eng. wavelet)



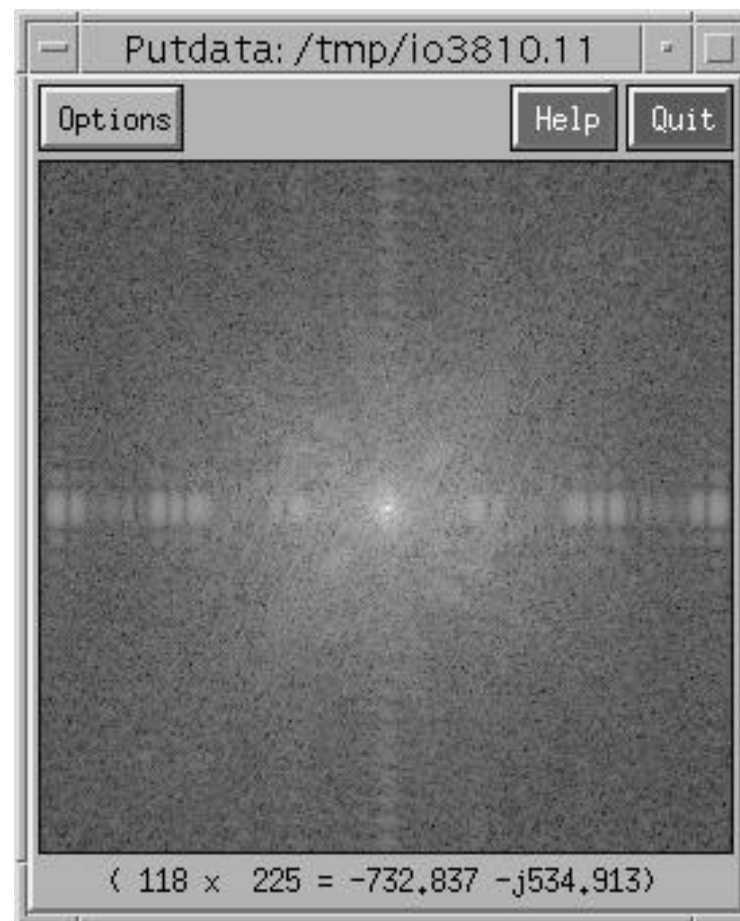
prostorno področje (3D)



frekvencijsko področje (3D)

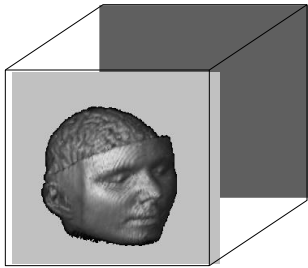


projekcija



frekvencijsko područje (2D sloj)

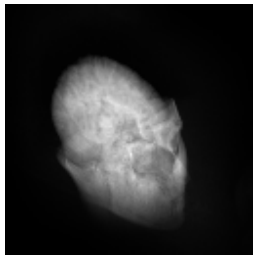
Prostorna domena



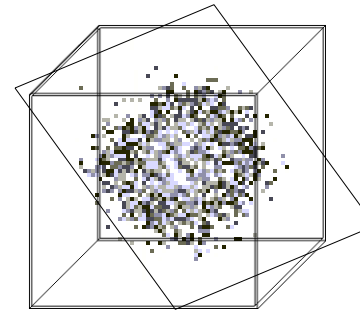
$f(p)$



projekcija



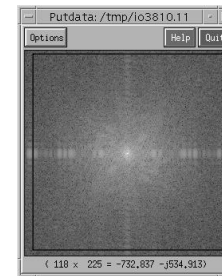
Frekvencijska domena



$F(s)$



presjek ravninom



DFT



IDFT

