

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 218
**VIZUALIZACIJA PODATAKA
FUNKCIJSKE MAGNETSKE REZONANCE**

Stanislav Žužić

Zagreb, lipanj 2011.

Sadržaj

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | Uvod..... | 1 |
| 2. | Osnove medicinske vizualizacije | 3 |
| 2.1. | Pregled metoda | 5 |
| 2.2. | Nazivlje | 6 |
| 2.3. | Povijest vizualizacije | 7 |
| 2.3.1. | Znanstvena vizualizacija i vizualizacija informacija | 9 |
| 2.3.2. | Uporaba računala..... | 12 |
| 2.3.3. | Povijest medicinske vizualizacije..... | 13 |
| 3. | Izvori podataka..... | 17 |
| 3.1. | CT..... | 17 |
| 3.1.1. | Princip rada..... | 19 |
| 3.2. | MRI | 20 |
| 3.2.1. | Princip rada | 21 |
| 3.2.2. | Podjela MRI strojeva | 23 |
| 3.2.3. | Načini snimanja..... | 24 |
| 3.3. | Zapis podataka | 28 |
| 3.3.1. | DICOM | 28 |
| 3.3.2. | Analyze | 33 |
| 3.3.3. | Klasični slikovni formati | 34 |
| 3.3.4. | RAW..... | 35 |
| 4. | Vizualizacija | 36 |
| 4.1. | Metode 2D vizualizacije | 36 |
| 4.1.1. | Reprezentacija podataka | 36 |
| 4.1.2. | Iscrtavanje slike..... | 40 |
| 4.1.3. | 2D vizualizacija u sustavu VTK | 42 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.1.4. | 2D vizualizacija uz korištenje alata MeVisLab..... | 44 |
| 4.1.5. | Obrada slikovnih podataka..... | 48 |
| 4.2. | Metode 3D vizualizacije | 49 |
| 4.2.1. | Volumno iscrtavanje..... | 50 |
| 4.2.2. | Primjer iscrtavanja iso-površina | 52 |
| 4.2.3. | 3D vizualizacija uz korištenje alata 3DSlicer | 54 |
| 5. | Zaključak | 58 |
| 6. | Sažetak | 59 |
| 7. | Popis slika i tablica | 60 |
| 7.1. | Popis slika | 60 |
| 7.2. | Popis tablica | 62 |
| 8. | Literatura | 63 |

1. Uvod

Moderna ljudska civilizacija proizvodi ogromne količine podataka svaki dan. Strojevi pogonjeni raznim tehnologijama prikupljaju informacije o svijetu iz mnogih izvora: umjetni sateliti i elektronički teleskopi konstantno primaju struju podataka iz svemira; napredni superračunala svakog dana obrađuju podatke iz mnogo izvora u analizi i predviđanju vremenskih prilika; radari, sonari i laserski senzori udaljenih objekata registriraju neposrednu i udaljenu okolinu radi raznih svrha, od uporabe u vojnim vozilima do detekcije jata riba u ribolovu. Osim navedenih primjera senzorskih podataka čovječanstvo generira i veliku količinu manje „opipljivih“ podataka: velike financijske burze svakodnevno provode stotine milijuna transakcija; važni događaji u društvu predstavljaju se svakog dana u obliku vijesti i akumuliraju u razne statistike.

Sve su te informacije u svojoj suštini gomila brojeva kojima je pridodan smisao. Računala nemaju problema u analizi takvih podataka, no ljudi će teško shvatiti značenje hrpe brojeva bez nekakve dodatne obrade. Jedan od najboljih načina prezentacije informacija i skupova podataka je pomoću vizualizacije. Ugrubo rečeno, vizualizacija je postupak pretvorbe podataka i informacija u sliku. No, kao što je poznati računalni znanstvenik Richard Hamming rekao: „*The purpose of computing is insight, not numbers.*“, također se može reći da je svrha vizualizacije **uvid**, a ne slike. Čovjek kojemu se prezentira učinkovita slika će puno bolje i brže shvatiti smisao informacija nego ako mu se one prikažu u sirovom formatu. Nadalje, promatrajući sliku ljudi dolaze do dubljeg razumijevanja informacija i lakše će otkriti skrivene veze u skupu podataka koje bi inače prošle nezamijećene.

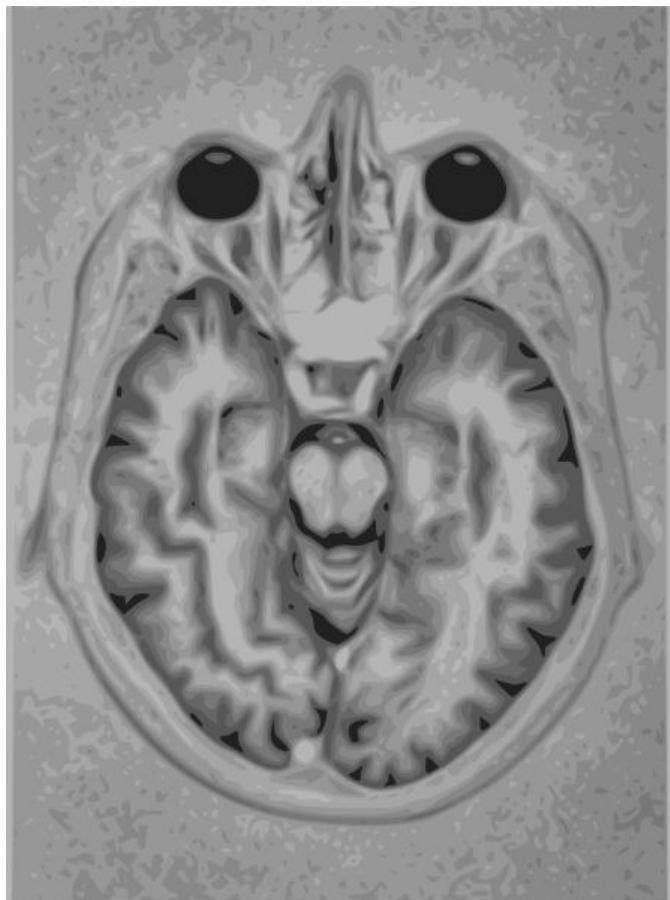
Razlog zašto je vizualizacija tako dobar alat je što ona upotrebljava prirodne sposobnosti ljudskog osjetila vida, koji je jedan od najkompleksnijih i najmoćnijih sustava u mozgu. Osim što mozak brzo i učinkovito procesuira 2D slike i grafove, on posjeduje i sposobnosti lakog prepoznavanja 3D scena i objekata, te stvaranje kompletnije mentalne slike predmeta integriranjem slika različitih perspektiva. Efekt vizualizacije se može pojačati ukoliko se rezultati predstave na interaktivni način, omogućujući korisniku slobodu u prikazu i kontrolu nad dobivenom slikom. Na taj način korisnik će brže doći do shvaćanja informacija – prilagođavanjem slike (primjerice, rotiranjem ili skaliranjem objekata) na svoj individualni način lakše

će eliminirati eventualni nesklad u shvaćanju. Konačno, dodavanjem dimenzija vremena i generiranjem animacije dobiva se dodatni uvid u skup podataka, ukoliko on posjeduje temporalni element u svojoj naravi.

Ovaj diplomski rad fokusirat će se na korištenje vizualizacije i njenih glavnih tehnika za predstavljanje podataka dobivenih funkcijskom magnetskom rezonanciom, s naglaskom na skupove podataka koji predstavljaju mozak pacijenta.

2. Osnove medicinske vizualizacije

Medicinska vizualizacija je skup postupaka i tehnika čiji je cilj stvaranje preciznih slika ljudskog tijela (ili određenih dijelova tijela) radi dobivanja većeg uvida u medicinsko stanje pacijenta. Ona je dio biološke vizualizacije te spada u kategoriju znanstvenih vizualizacija (za razliku od informacijskih vizualizacija koje se bave prezentacijom velikih skupova nenumeričkih podataka, poput datoteka, baza podataka, relacija na Internetu itd.). Primjer vizualizacije prikazan je na slici 1, koja pokazuje aksijalni presjek ljudskog mozga, dobiven magnetskom rezonancicom.

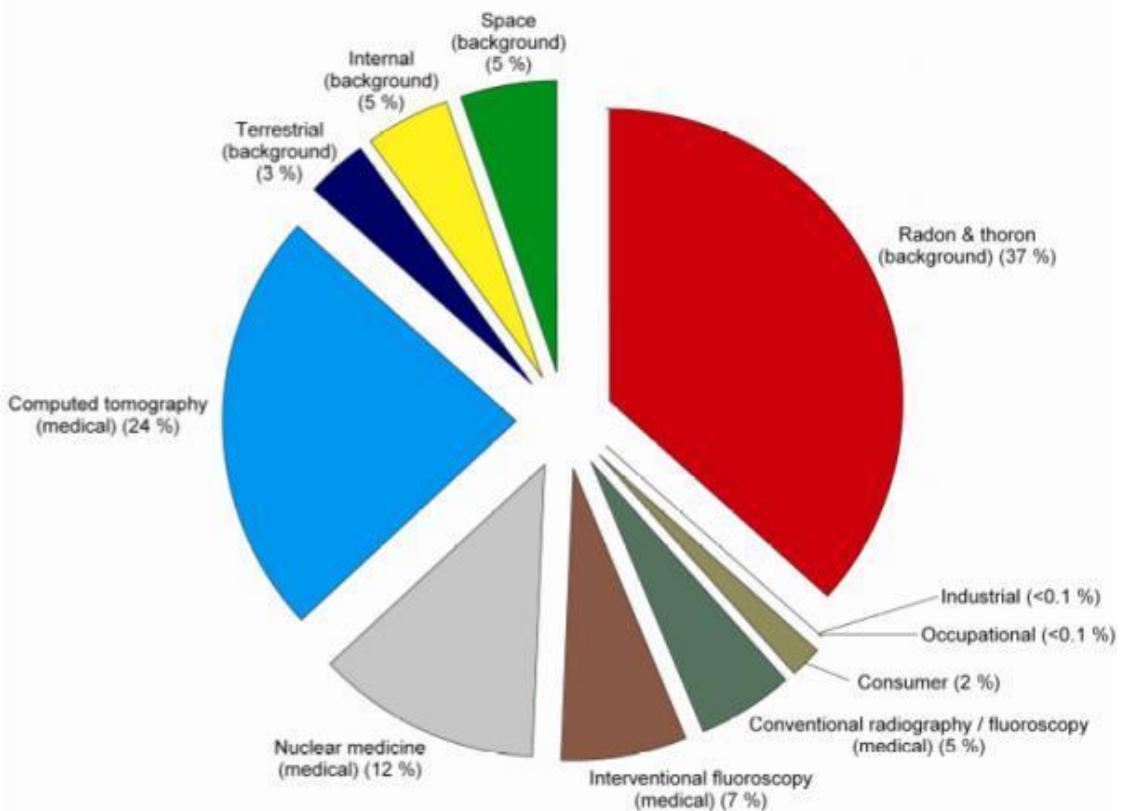


Slika 1 – Primjer vizualizacije mozga iz MRI izvora, [3]

U domeni medicinske znanosti vizualizacija se upotreblja radi raznih primjena, koje uključuju:

- Dijagnostiku – predstavlja snažan alat koji doktorima pomaže u otkrivanju i utvrđivanju bolesti kod pacijenata
- Istraživanje – stručnjaci koji se bave analizom strukture i funkciranja raznih dijelova ljudskog tijela često koriste vizualizaciju radi boljeg uvida u proučavani organ

Vizualizacija je danas vrlo uvriježena tehnika u medicini koja se redovito upotrebljava; do 2010. u cijelom svijetu provedeno je oko 5 milijardi vizualizacijskih studija. U SAD-u pacijenti su u prosjeku podvrgnuti 7 puta većoj količini ionizacijskog zračenja nego što je to bio slučaj prije 30 godina; procjenjuje se da zračenje iz medicinskih skenova sačinjava pola ukupnog zračenja kojemu je podvrgnut prosječni amerikanac, što je prikazano na slici 2.



Slika 2 – Izlaganje zračenju američke populacije, [5]

[3][4][5]

2.1. Pregled metoda

U ovoj sekciji dan je sažet popis svih važnih područja i tehnologija korištenih u medicinskoj vizualizaciji, od izvora podataka do konačnog prikaza na računalu. U ostatku ovog rada te će se metode i postupci opisati, uz pregled njihovih prednosti i nedostataka.

Tehnologije korištene za dobivanje podataka:

- Radiografija
- Magnetska rezonanca
- Nuklearna medicina
- Termografija
- Računalna tomografija
- Ultrazvuk

Najčešće korišteni digitalni formati podataka:

- DICOM
- Analyze
- Klasični slikovni formati (JPEG/BMP/GIF)
- Raw
- GE MRI
- ECAT
- Siemens Somatom
- VTK

Metode dobivanja 3D slike:

- Jednostavne metode
 - Slicing
 - Cuberille
- Izravna vizualizacija

- Transfer funkcija
- Ray-casting
- Splatting
- Prikaz površina

2.2. Nazivlje

Nekoliko osnovnih pojmove imaju slično značenje koje se u nekim kontekstima preklapa, no ipak postoje razlike. Radi razrješavanja eventualnih nedoumica dane su sljedeće definicije osnovne terminologije:

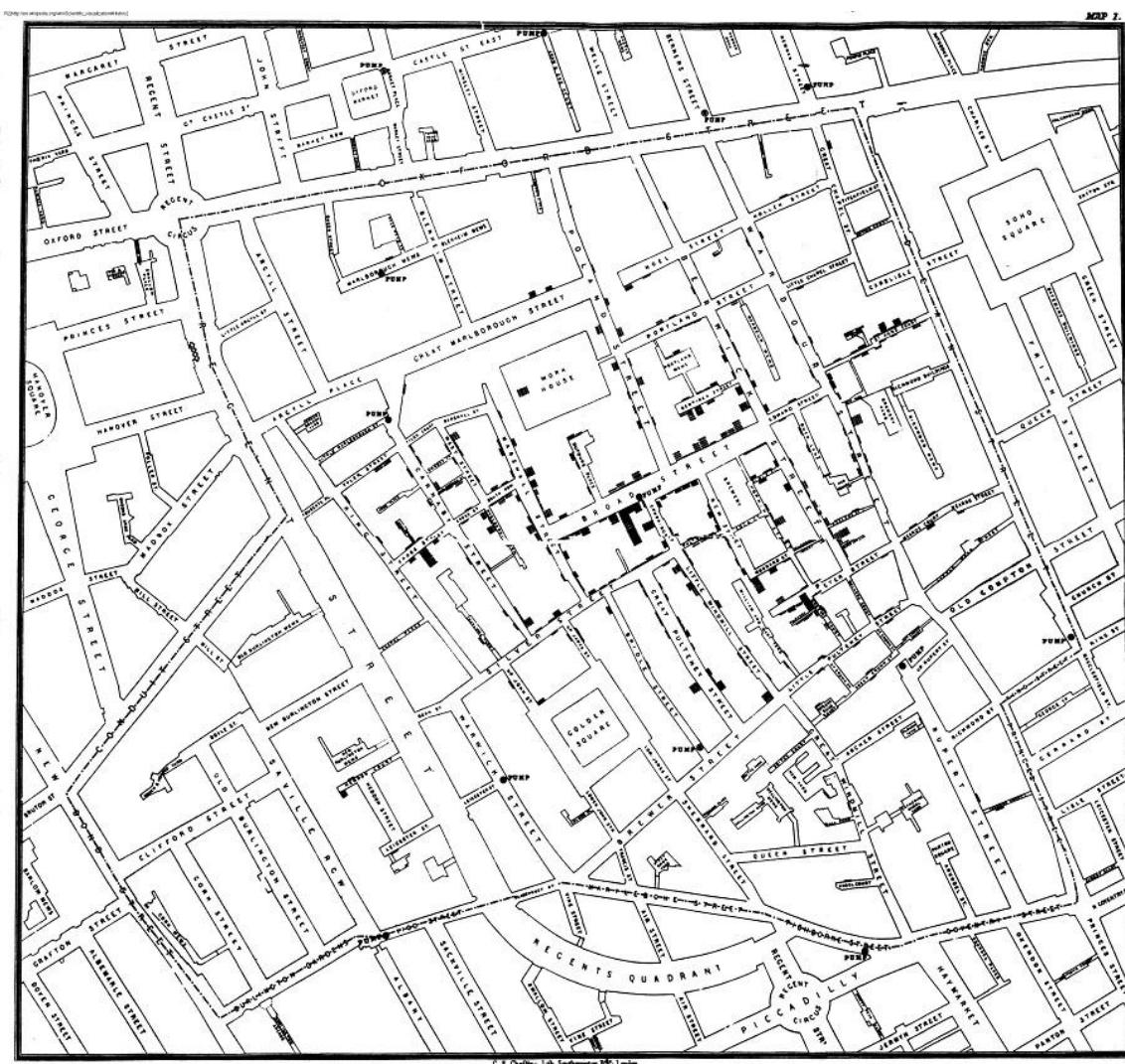
- Procesiranje slika (engl. *imaging*) – područje je koje proučava dvodimenzionalne slike, operacije koje se na njima vrše (poput rotiranja i skaliranja), načine ekstrahiranja informacija iz slika, mogućnosti poboljšavanja kvalitete slika i ostale metode analize
- Računalna grafika (engl. *computer graphics*) – obuhvaća procese kreiranja slika korištenjem računala, što uključuje i 2D i 3D prikaze (engl. *rendering*)
- Vizualizacija (engl. *visualization*) – je skup metoda čiji je cilj istraživanje, transformacija i pregled podataka i informacija u slikovnom obliku, radi dobivanja boljeg razumijevanja i uvida u podatke

Jedan način razlikovanja računalne grafike i vizualizacije je dimenzionalnost podataka – postoji mnogo poznatih metoda u domeni računalne grafike za prikaz skupova podataka koji su 1D, 2D ili 3D; s druge strane, postupci vizualizacije su učinkovitiji kad se primjenjuju na podatke veće dimenzionalnosti. Nadalje, vizualizacija se bavi i transformacijom podataka – informacije se redovito stvaraju, rekreiraju i modificiraju radi poboljšavanja smislenosti skupa podataka. Takav proces obično zahtijeva određenu interaktivnost: čovjek direktno utječe na tijek transformacije podataka.

[1 – str. 4]

2.3. Povijest vizualizacije

Prikaz informacija u slikovnom obliku nije nova stvar; ljudi su se oduvijek služili vizualizacijom u širem smislu riječi. Na primjer, geografske informacije se već tisućama godina prezentiraju u vrlo praktičnom obliku zemljopisnih karata.



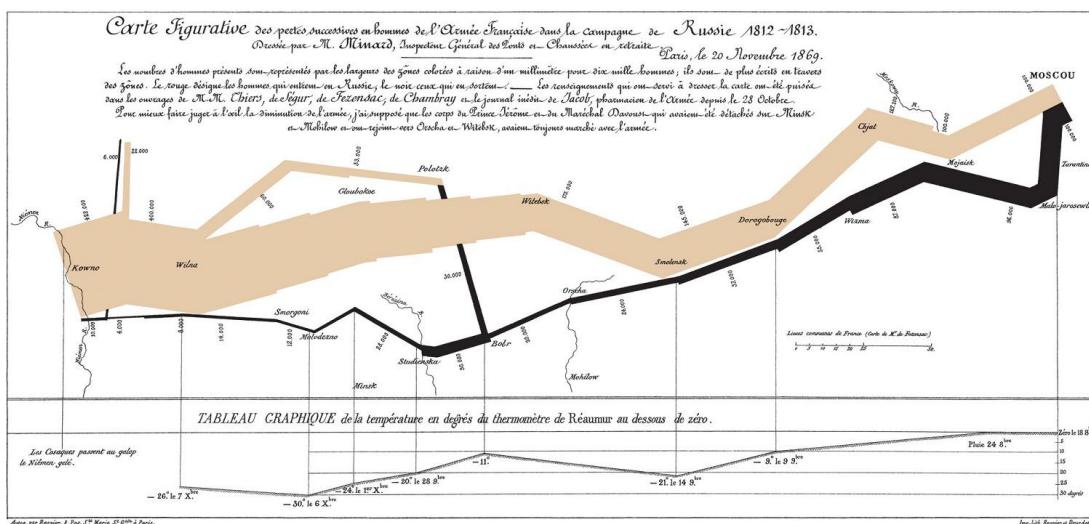
Slika 3 – Originalna karta Dr. Johna Snowa koja pokazuje nakupine slučajeva kolere, [6]

Sredinom 19. st. u Londonu je izbila epidemija kolere koja je odnijela više od 600 života. Budući da se u to vrijeme nije znalo za klice kao uzročnike zaraznih bolesti, ljudi nisu shvatili da je jedna zaražena vodena pumpa krivac za širenje bolesti. John Snow, doktor koji se danas smatra ocem epidemiologije, odlučio je prikazati prijavljene slučajeve kolere na karti gradske četvrti točkastim oznakama.

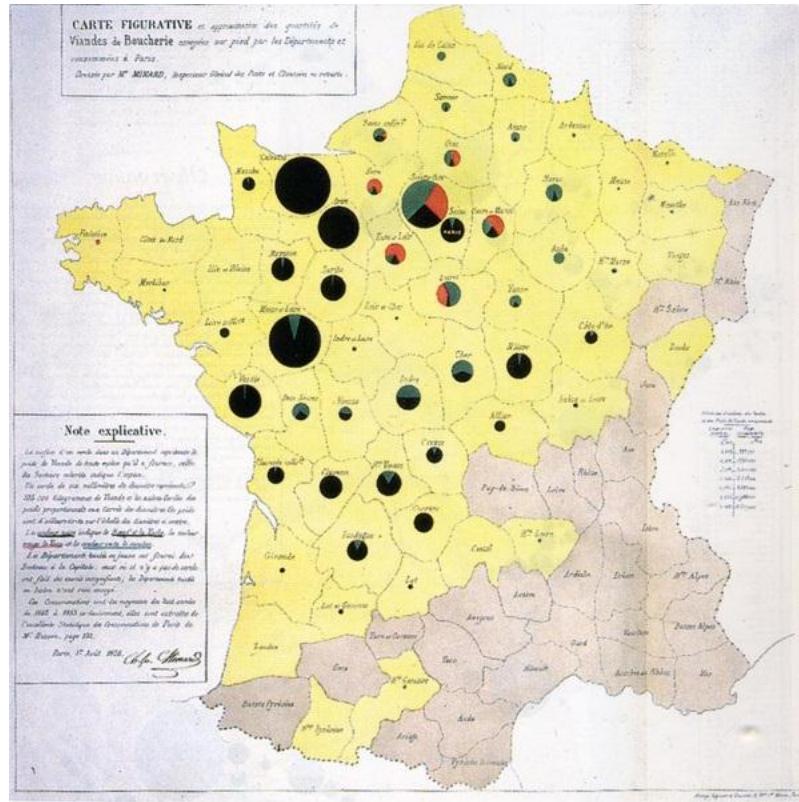
Njegova originalna karta prikazana je na slici 3. Koristeći taj jednostavni oblik vizualizacije bilo mu je očito da se bolest javlja u nakupinama oko centralnog izvorišta – kontaminirane vodene pumpe. Sa svojim nalazima uspio je nagovoriti gradske vlasti da izbace pumpu iz uporabe, čime se epidemija zaustavila.

U istom vremenskom periodu u Francuskoj je djelovao Charles Minard, građanski inženjer i pionir grafičkih reprezentacija u inženjerstvu i statistici (slika 5). Njegovo najpoznatije djelo, objavljeno 1869., prikazuje Napoleonovu neuspješnu vojnu kampanju u Rusiji 1812. – 1813. Minard je na 2D slici, prikazanoj na slici 4, uspio prikazati nekoliko varijabli:

- Položaj i smjer kretanja vojske, s prikazima gdje su se dijelovi vojske odvojili te potom ujedinili
- Opadajuće brojeve vojnika
- Niske temperature za vrijeme povlačenja vojske



Slika 4 – Minardova vizualna reprezentacija Napoleonovog vojnog pohoda u Rusiji, [7]



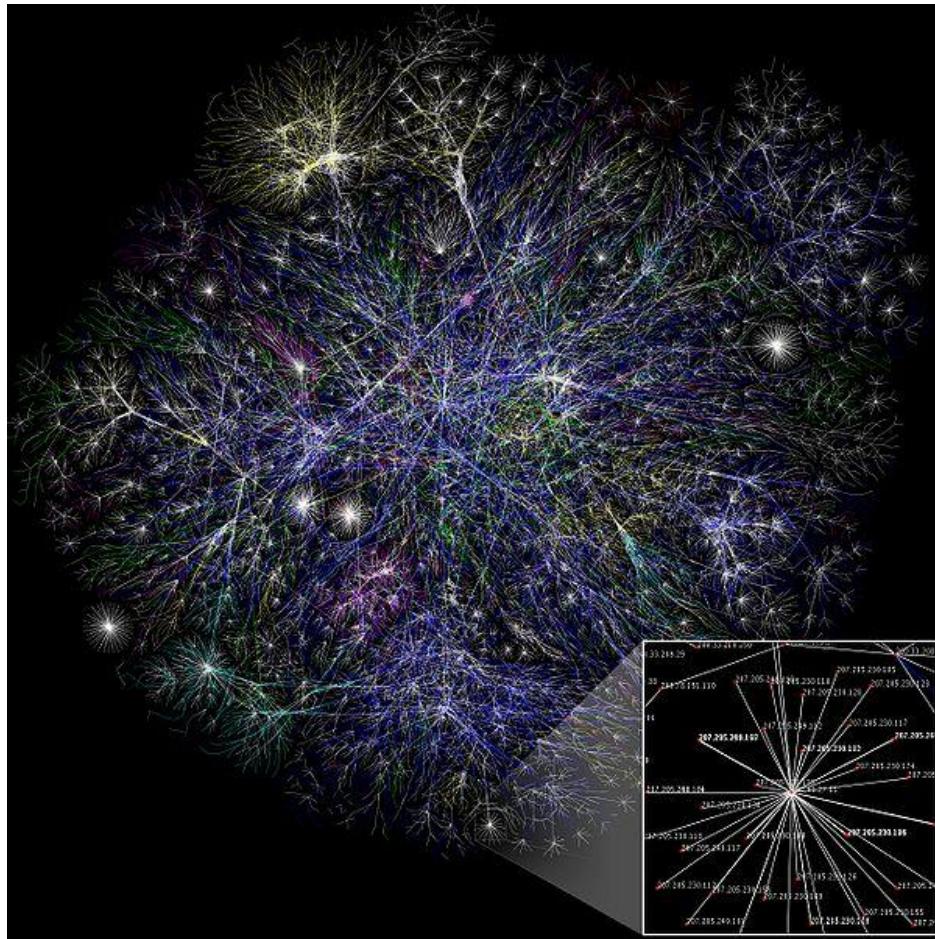
Slika 5 – Minardova karta Francuske na kojoj je grafički prikazana količina stoke poslana u Pariz, [7]

[6][7]

2.3.1. Znanstvena vizualizacija i vizualizacija informacija

Glavna podjela vizualizacijskih metoda dijeli ih na dvije kategorije: znanstvenu i informacijsku vizualizaciju. Informacijska vizualizacija bavi se grafičkim reprezentacijama velikih skupova nenumeričkih podataka, primjerice:

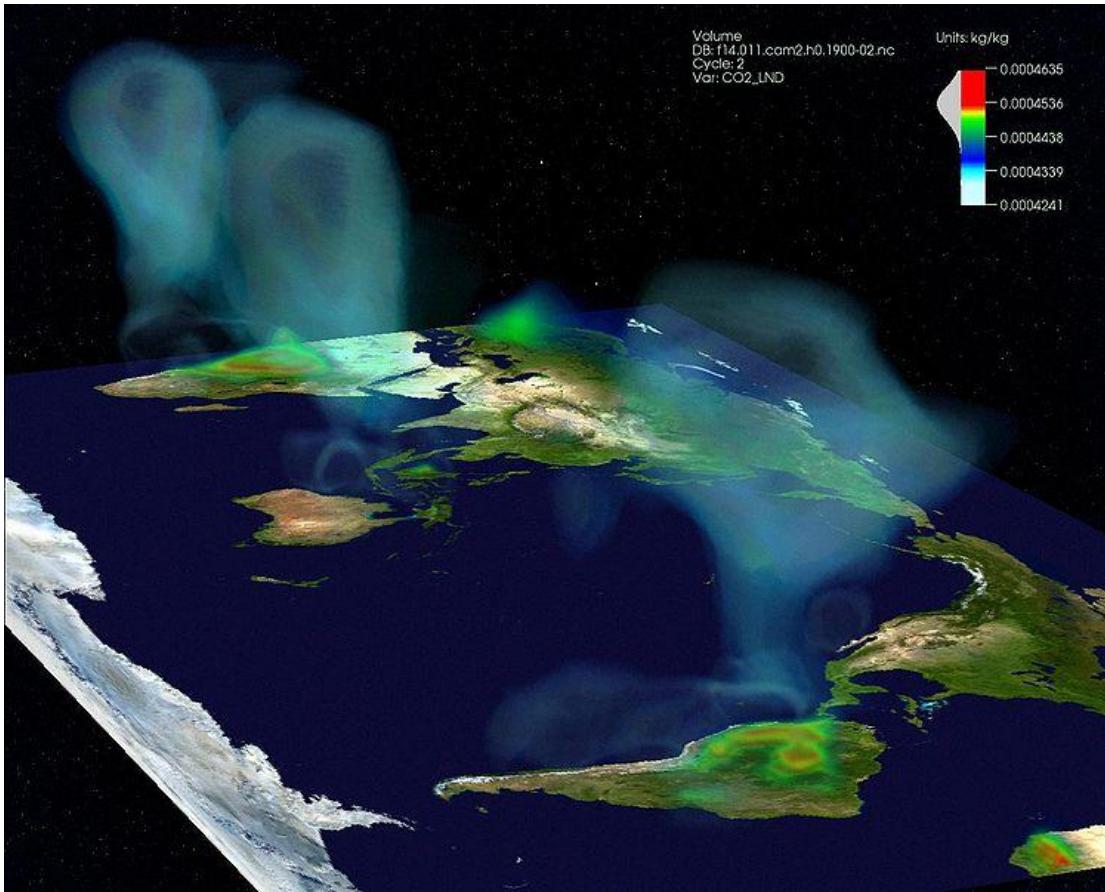
- Linije koda u programskim sustavima
- Knjižnice i ostale kolekcije informacija
- Bibliografske baze podataka
- Mreže podataka i relacija (npr. Internet)



Slika 6 – Djelomična mapa Interneta iz 2006., [8]

Slično kao i kod ostalih vrsta vizualizacija, pretpostavlja se prednost vizualnih reprezentacija podataka i interaktivnih tehnika na temelju kompleksnog i dobro razvijenog ljudskog osjetila vida, koji korisnicima omogućuje da istražuju, uče i shvaćaju vrlo velike količine informacija odjednom. Cilj informacijske vizualizacije je usavršavanje prezentacije apstraktnih skupova podataka na što intuitivniji način.

S druge strane, znanstvena se vizualizacija u prvom planu bavi metodama prikazivanja trodimenzionalnih pojava kod kojih je realistična prezentacija nužni uvjet resultantnog prikaza.



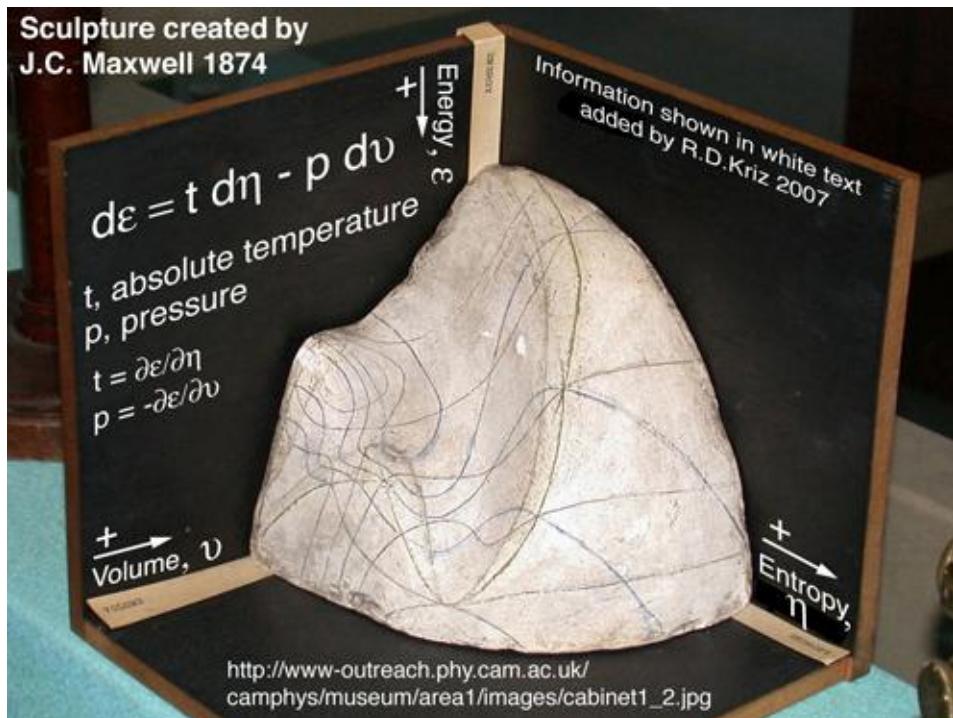
Slika 7 – Primjer znanstvene vizualizacije: prikaz meteoroloških prilika, [9]

Neka od brojnih područja primjene su:

- Medicinska i biološka vizualizacija
- Arhitektura i građevinarstvo
- Isrtavanje geološkog terena
- Meteorologija i prirodne pojave
- Vizualizacija toka
- Mikroskopske tvorevine poput atoma i molekula
- Makroskopski objekti i pojave, primjerice zvijezde i gravitacijski valovi

Jedan od prvih primjera 3D znanstvene vizualizacije je Maxwellova termodinamička površina, koju je 1874. od gline izradio škotski fizičar James Clerk Maxwell. Model je izrađen na temelju Josiah Gibbsovih znanstvenih radova koji

objašnjavaju odnose između volumena, entropije i energije tvari na različitim temperaturama i tlakovima, čime se definira tzv. termodinamička površina. Budući da Gibbs u svojim radovima nije uključio nikakve dijagrame, Maxwell je odlučio izraditi odgovarajući model u obliku skulpture od gline.



Slika 8 – Maxwellova termodinamička površina iz 1874., [10]

[8][9][10]

2.3.2. Uporaba računala

Računala su se od svojih početaka koristila za proučavanje i analizu znanstvenih problema, no u ranim danima računalne grafike tehnologija je još bila nedovoljno razvijena za korisnu primjenu u vizualnoj prezentaciji informacija. Vizualizacija kao formalna disciplina započinje 1987. kad je objavljen članak *Vizualizacija u znanstvenom računarstvu* (engl. *visualization in scientific computing*), u kojem se po prvi put koristi termin „znanstvena vizualizacija“.

U narednim godinama područje vizualizacije je brzo raslo, potpomognuto brojnim konferencijama poput *IEEE Visualization* i *ACM SIGGRAPH*. Jedan od najočitijih primjera uporabe vizualizacije je vremenska prognoza – televizijski

prezenteri redovito koriste računalno generirane prikaze trenutnog i budućeg stanja u atmosferi radi lakšeg i boljeg pregleda.

[1, str: 5–6][11]

2.3.3. Povijest medicinske vizualizacije

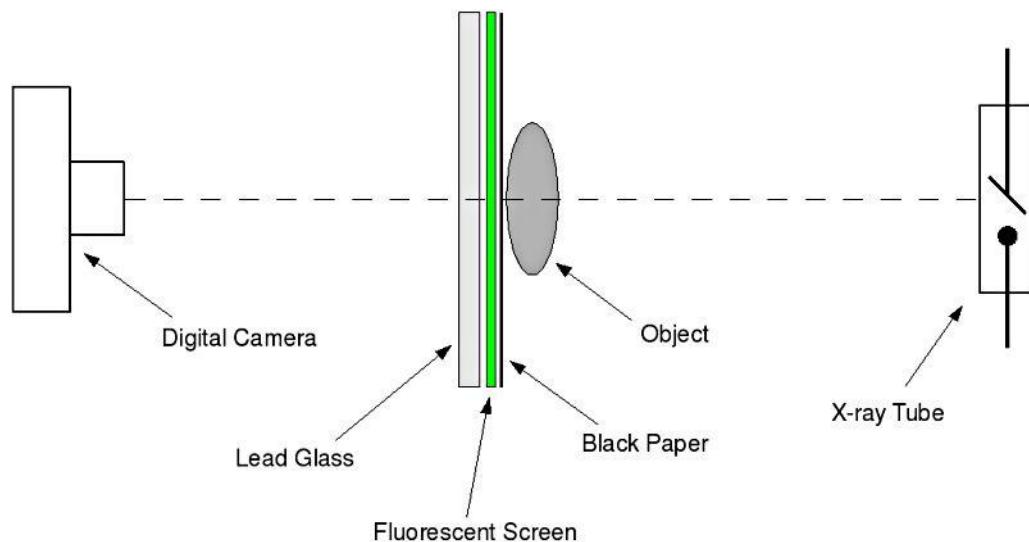
Ipak, u području dijagnostičke medicine vizualizacija se upotrebljavala i prije pojave računala. Radiologija je grana medicinske znanosti koja se bavi izradom slikovnih reprezentacija dijelova ljudskog tijela koristeći razne tehnologije, u cilju diagnosticiranja i liječenja bolesti. Nastala je nedugo nakon otkrića rendgenskih zraka krajem 19. st. i razvijala se relativno brzo do početka Drugog svjetskog rata.



Slika 9 – Prva medicinska rendgenska slika; snimljena 1895., predstavlja šaku žene Wilhelma Röntgena, [13]

Prvih 50 godina u radiologiji glavni medij za pohranu podataka je bila kaseta s trakom. Rendgenske zrake bi se fokusirale na željeni dio tijela kroz koji bi prošle i nastavile do sloja trake, gdje bi ostavile svoj trag. Takav način snimanja je bio vrlo dugotrajan; rendgen glave mogao je trajati i više od 10 minuta, što je pacijente izlagalo velikim količinama radijacije. Ubrzo je izumljena posebna vrsta fluorescentnih prozora koji su omogućili doktorima da promatraju rendgenske slike u realnom vremenu, no budući da je to zahtjevalo gledanje direktno u rendgenske zrake, i doktori su primali prevelike doze radijacije. Da bi riješio taj problem,

George Schoenander je 1946. razvio stroj koji je automatski mijenjao kasete na kojima se spremala slika. Nakon nekoliko preinaka, do 1953. takav stroj je imao mogućnost snimanja do 6 slika u sekundi.



Slika 10 – Rendgenski način snimanja s fluorescentnim ekranom, [14]

Sljedeći veliki razvoj je uporaba kontrastne tekućine ili gradijenta (engl. *contrast medium*), koju bi pacijent uzeo ili oralnim putem ili u injekciji. Radiolozi su po prvi puta mogli dobiti jasnu sliku krvnih žila, žučnih vodova, probavnog sustava i još nekih organa. 1955. razvijeno je pojačalo rendgenske slike (engl. *x-ray image intensifier*) koje je omogućilo primanje i prikazivanje rendgenskih zraka na televizijskom ekranu. Do 1960-ih ova tehnika je gotovo u potpunosti zamijenila dotadašnju tehnologiju fluorescentnih ekrana, te je otvorila put za novu granu unutar radiologije: angiografiju, koja uglavnom bavi analizom arterija, vena i srčanih komora.



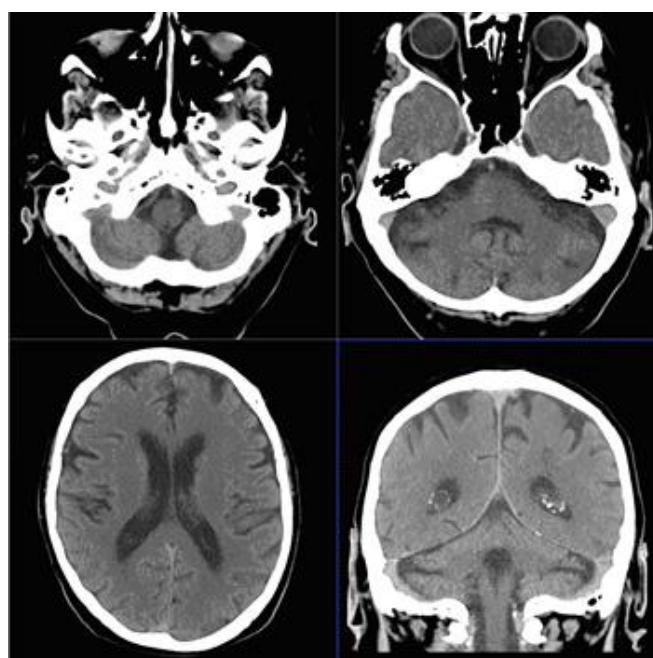
Slika 11 – Kompletni sken kostiju tijela dobiven nuklearnom medicinom, [15]

Sredinom 20. st. svoje začetke je imala i nuklearna medicina, čije se tehnike baziraju na uvođenju niskoradioaktivnih kemikalija u ljudsko tijelo. Te se kemikalije zatim rasprostiru po tijelu i ulaze u razne organe, iz kojih emitiraju niske razine radijacije. Vanjski detektori (engl. *gamma cameras*) registriraju radioaktivne signale i konstruiraju sliku tijela. U tom razdoblju je razvijena još jedna metoda dobivanja slike, temeljena na principima rada sonara (tehnologija koja se vrlo razvila za vrijeme Drugog svjetskog rata) – ultrazvuk. Koristeći odašiljač zvučnih valova (nečujnih, vrlo visoke frekvencije) koji se približi željenom dijelu tijela, emitira valove koji prolaze kroz tijelo i odbijaju se natrag, stroj registrira povratne signale i generira sliku unutrašnje strukture tijela i kontura organa.



Slika 12 – Ultrazvuk fetusa, [16]

1970-ih započinje digitalna era medicinske vizualizacije s izumom računalne tomografije (engl. *computed tomography* – CT). CT je radiološka metoda koja daje slojeviti prikaz dijela tijela, koristeći ionizirajuće-rendgensko zračenje, specijalni rotirajući okvir i digitalno računalo. Druga velika digitalna tehnologija je magnetska rezonancija (engl. *magnetic resonance imaging* - MRI) koja se temelji na otkrivenoj pojavi da različiti materijali rezoniraju na različitim intenzitetima magnetskog polja.



Slika 13 – Tipični CT sken ljudske glave, [17]

[12][13][14][15][16][17]

3. Izvori podataka

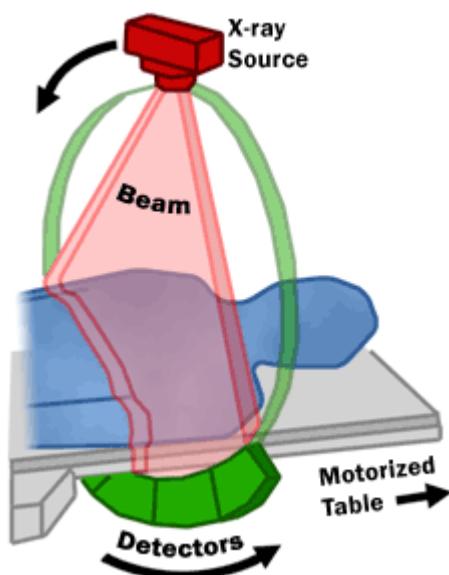
U ovom poglavlju opisat će se glavne metode za dobivanje podataka o ljudskom tijelu za potrebe medicinske vizualizacije. Kratak kronološki pregled radioloških i digitalnih tehnologija dan je u prošlom poglavlju; ovdje će se razmatrati samo digitalne metode CT i MRI.

3.1. CT

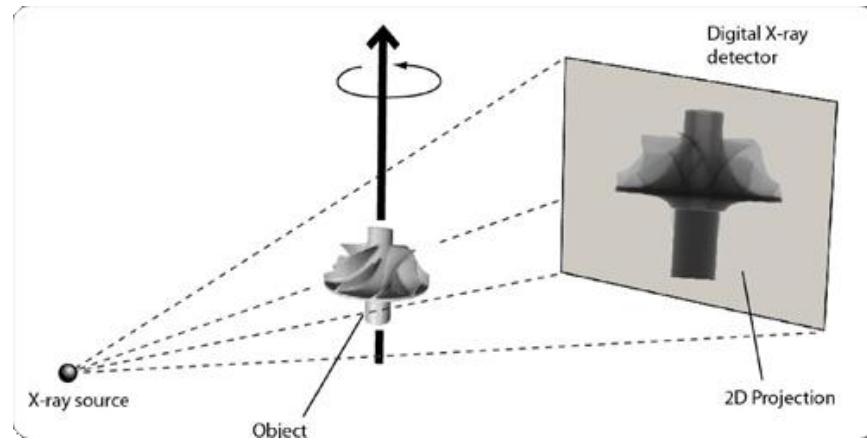
Računalna tomografija (CT) radiološka je metoda koja koristi ionizirajuće-rendgensko zračenje za dobivanje slojevitog prikaza željenog dijela tijela. U dobivenoj slici, koja može biti 2D ili 3D, dobro su vidljive karakteristike unutrašnje strukture organa, primjerice: veličina, oblik, gustoća, defekti itd.

Procedura rada CT stroja kod skeniranja pacijenta:

1. Motorizirana podloga pomakne ležećeg pacijenta u unutrašnjost CT stroja.
2. Unutar kućišta stroja izvor rendgenskih zraka i detektor rotiraju se oko pacijenta. Jedna rotacija traje u prosjeku 1 sekundu. Rendgenski izvor proizvodi uski snop zraka u obliku lepeze koji prolazi kroz određeni dio tijela pacijenta.

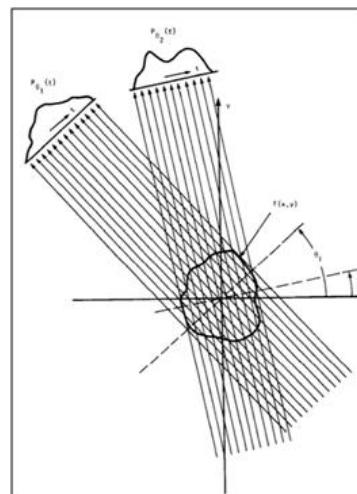


Slika 14 – Prikaz lepezastog snopa rendgenskih zraka kod CT skeniranja



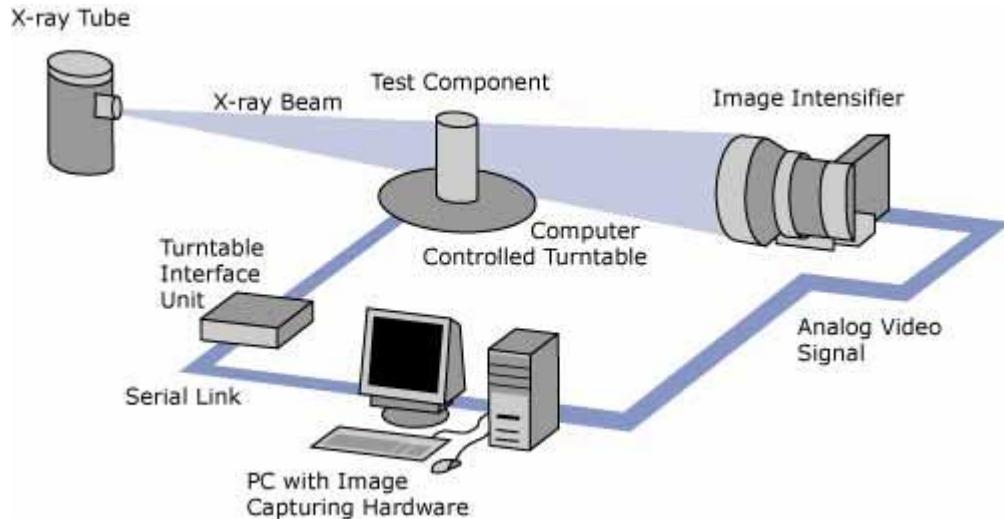
Slika 15 – Dobivanje jedne rendgenske trenutačne snimke, [21]

3. Detektor je smješten na suprotnoj strani od rendgenskog izvora, te redovito proizvodi trenutačne snimke (engl. *snapshots*). Za vrijeme jedne rotacije izradi se veći broj snimaka, iz različitih kutova.



Slika 16 – Prikaz snimanja iz različitih kutova, [22]

4. Nakon svake rotacije prikupljeni podaci šalju se u računalo koje zatim rekonstruira individualne snimke u jedan ili više poprečnih presjeka, tzv. slajsova (engl. *slice*).



Slika 17 – Shema modernog CT sustava, [20]

Iako je uporaba CT skeniranja veliki napredak u modernoj medicini i često od iznimne važnosti u dijagnosticiranju bolesti, zbog izlaganja štetnom zračenju postoje rizici:

- Povećani dugoročni rizik od raka uslijed izlaganju rendgenskim zrakama
- Moguće alergijske reakcije ili zatajenje bubrega zbog korištenja kontrastne tekućine
- Dugotrajno izlaganje većim dozama zračenja ponekad ima i druge nuspojave: crvenilo kože (*erythema*), gubitak kose, katarakti itd.
- Djeca su osjetljivija na zračenje – kod njih se zato često koriste manje doze rendgenskih zraka
- Veći rizik od urođenih defekata ako se skeniranje vrši na trudnicama

3.1.1. Princip rada

Rendgenske zrake pri prolasku kroz snimani dio tijela oslabljuju (engl. *attenuate*), do čega dolazi zbog apsorpcije i rasapa zračenja. Slabljenje nije jednako u svim vrstama tkiva – ono ovisi o više faktora:

- Atomskom broju
- Elektronskoj gustoći tkiva

- Energiji rendgenskih zraka

Koeficijent apsorpcije označava do koje mjere atenuacije je došlo. Što je veći atomski broj i elektronska gustoća tkiva, koeficijent apsorpcije će biti veći.

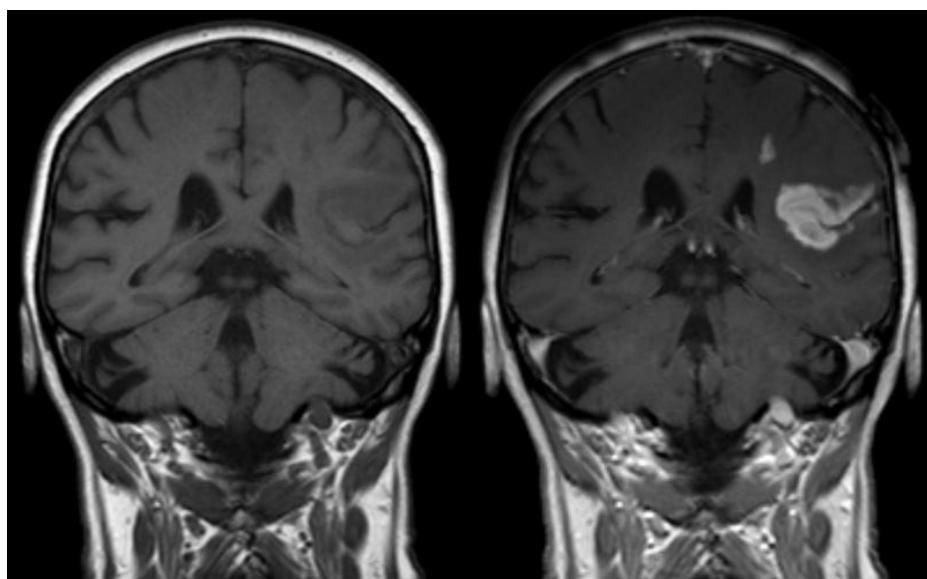
Nakon prolaska kroz tijelo pacijenta zrake nastavljaju put do detektora rendgenskog zračenja. U njemu one se pretvaraju u električne signale, čija je snaga proporcionalna atenuaciji, koji se šalju u računalo gdje će se izvršiti rekonstrukcija slike.

[18][19][20][21][22]

3.2. MRI

Za razliku od CT-a, postupak magnetske rezonance (MRI) ne koristi rendgenske zrake, što je velika prednost jer pacijenti ne bivaju izloženi opasnim dozama ionizirajućeg zračenja. MRI se bazira na uporabi snažnih magneta i radio valova za dobivanje slike unutrašnjosti ljudskog tijela.

Ako se uz MRI stroj koristi i gradijent (s paramagnetskim svojstvima) moguće je dobiti bolju kvalitetu slike, jer će kontrastna tekućina utjecati na elektromagnetsko ponašanje tkiva.

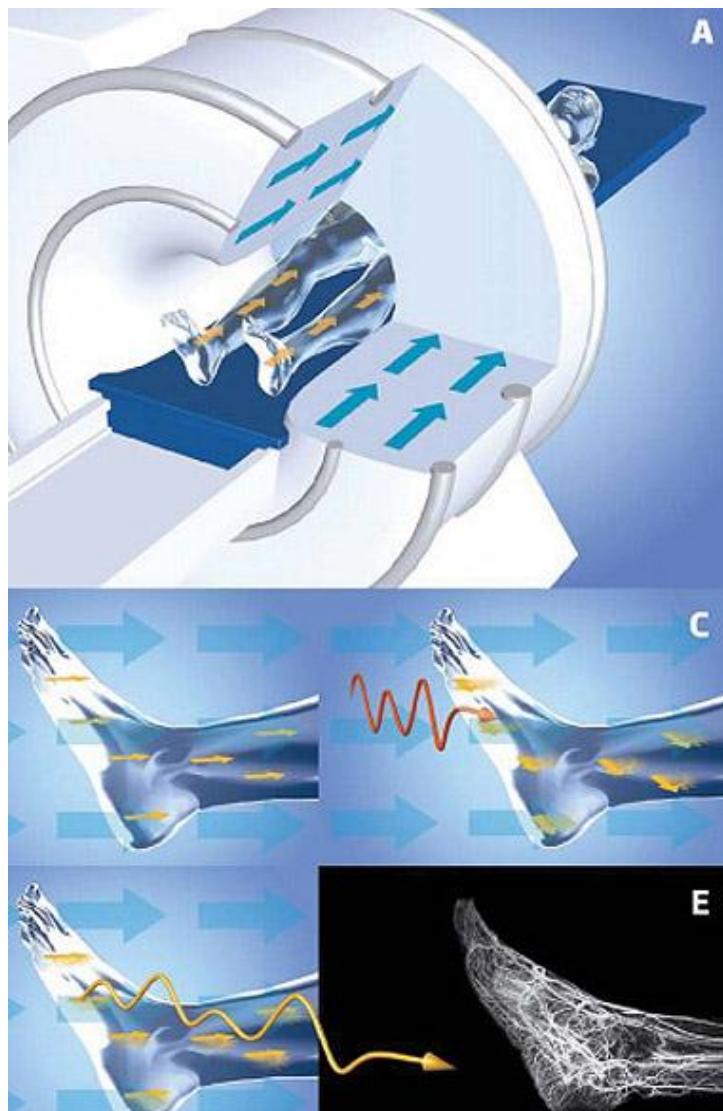


Slika 18 – Usporedba MRI snimke bez (lijevo) i s korištenjem gradijenta (desno), [23]

MRI tehnologija je posebno korisna kod skeniranja sljedećih dijelova tijela:

- Mozga
- Srca i kod analize krvnih žila
- Mišića i zglobova
- Kod detekcije raka

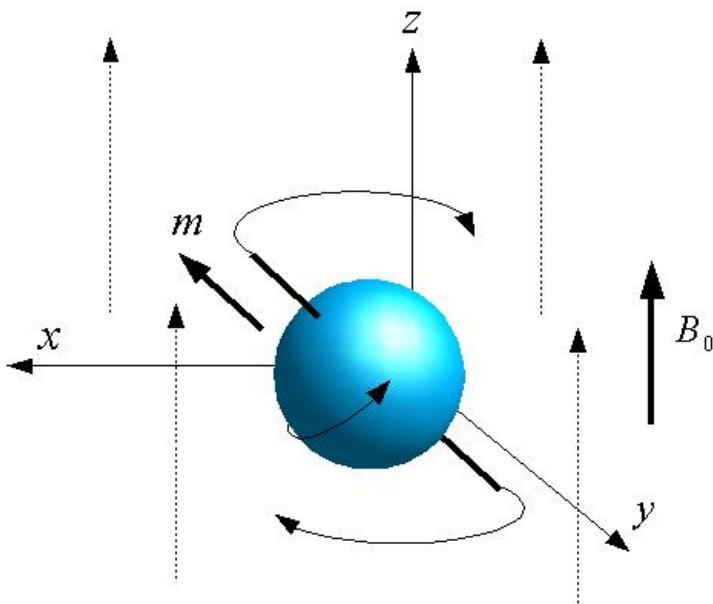
3.2.1. Princip rada



Slika 19 – Koraci u radu MRI stroja, [24]

- A. Magnet koji okružuje pacijenta proizvede jako magnetsko polje.
- B. Pod njegovim se utjecajem jezgre atoma vodika, koji se nalaze po cijelome ljudskom tijelu, poravnaju sa smjerom polja.
- C. Zatim se emitira kratki puls radio valova koji uzrokuje izbacivanje vodikovih jezgara iz poravnanja s magnetskim poljem.
- D. Prestankom emitiranja radio valova jezgre se vrate u početni položaj te su opet orientirani prema magnetskom polju.
- E. Povratkom u početni položaj, vodikove jezgre emitiraju elektromagnetske signale koji se registriraju i koriste za generiranje slike. Budući da brzina pomicanja vodikovih jezgara ovisi u tkivu u kojemu se nalaze (npr. mišić, masno tkivo, kost, ...) vrijeme potrebno za povratak u početni položaj otkriva karakteristike tog tkiva.

Poravnavanje vodikovih jezgara se temelji na fizikalnom svojstvu spina. Protoni u jezgri se konstantno vrte (engl. *precess*) oko određene osi; ta vrtnja proizvodi vlastito magnetsko polje vrlo slabe snage. Proton ima svoj sjeverni i južni pol uslijed tog magnetskog polja.



Slika 20 - Precesija spina jezgre u magnetskom polju, [26]

U normalnom stanju spin protona je kaotičan i neodređen, no kada se pokrene magnetsko polje osi spinova protona se usklade i poravnaju s vanjskim magnetskim poljem. Otprilike pola protona se orijentira u smjeru magnetskog polja, a druga polovica u suprotnom smjeru.

3.2.2. Podjela MRI strojeva

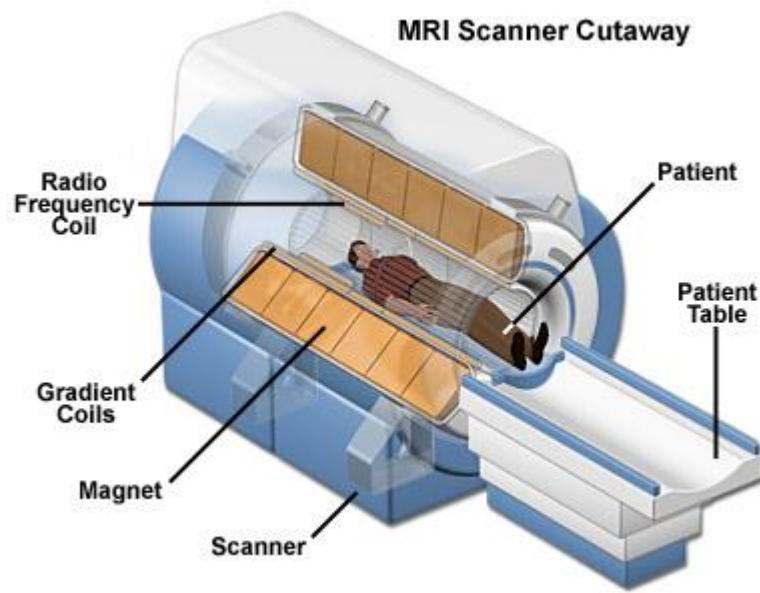
Postoji više različitih implementacija MRI tehnologije. Prema jakosti magnetskog polja dijelimo ih na:

- Niske jakosti – do 0,5 T (tesle).
- Srednje jakosti – od 0,5 T do 1 T.
- Visoke jakosti – više od 1 T.

Napomena: jakost Zemljinog magnetskog polja iznosi oko 50 μT .

MRI strojevi se prema vrsti magneta dijele na:

- Rezistivne (otporničke) magnete – magnetska polja dobivaju se provođenjem jakih struja kroz posebne zavojnice. Ovakvi strojevi se uglavnom više ne koriste, zbog raznih problema u konstrukciji i korištenju.
- Permanentne magnete – magneti su izrađeni od materijala koji posjeduje feromagnetska svojstva i konstantno emitira magnetsko polje. Iako je kod ovakvih strojeva teško postići polja jača od 0,4 T, ipak se koriste jer su jeftini, dugotrajni i pouzdani. Zbog vrlo tihog rada i otvorenog načina konstrukcije vrlo su udobni za pacijente te se često koriste za intervencijske zahvate.
- Supravodljive magnete – za stvaranje mag. polja koriste zavojnicu supravodljivog materijala. Protjecanjem struje kroz takvu zavojnicu na vrlo niskim temperaturama generira se vrlo jako i homogeno magnetsko polje (do 9 T), stoga je to vrlo česti oblik implementacije. Nedostaci su im: visoka cijena nabave i održavanja, vrlo bučni u radu i stroži uvjeti snimanja.



Slika 21 – Shema MRI stroja, [25]

3.2.3. Načini snimanja

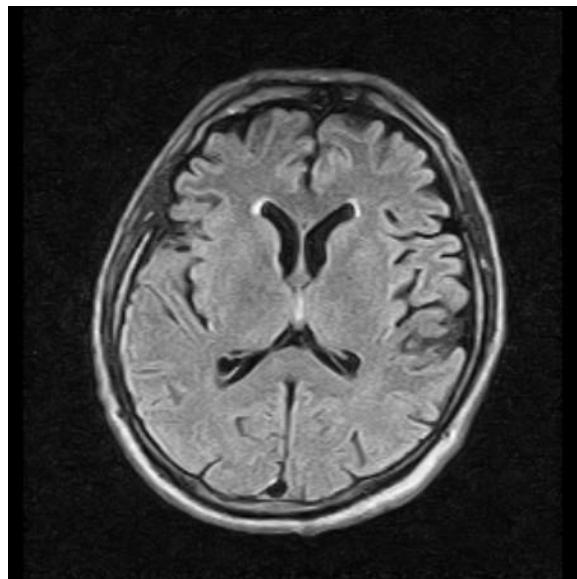
Jedna od prednosti magnetske rezonance nad drugim metodama dobivanja podataka je što MRI posjeduje niz načina snimanja tkiva. Karakteristične snimke u MRI terminologiji nazivaju se: T1 (trenutak kad je trećina protona u relaksiranom stanju) i T2 (2/3 protona relaksirano). T1 snimke daju visok signal za masna tkiva dok T2 snimke daju visok signal vode. Na temelju T1 i T2 snimki uspoređuju se različiti načini snimanja.

Tehnike korištenja samog spina:

- SE (*spin-echo*) – najjednostavniji je način snimanja; koristi T1 i T2 snimke.
- FSE (*fast spin-echo*) – tehniku kod koje se T2 snimka izrađuje prije vremena, radi ubrzavanja cijelokupnog procesa (inače bi, korištenjem SE tehnike, dobivanje T2 snimke zahtijevalo i do 12 minuta na uređaju snage 1 T). Tehnika FSE rezultira podacima na kojima je snimljen i dio signala masti, iako bi u T2 snimkama trebali biti vidljivi samo signali vode. Ipak, danas se sve T2 snimke izrađuju ovom tehnikom.
- IR (*inversion recovery*) – posebna je metoda uzimanja T1 snimke, koja rezultira kvalitetnijim rezultatima (veći kontrast i poboljšano razlikovanje tkiva

prema određenim karakteristikama – obično količini vode). Prije samog snimanja tkivo se „pripremi“ primjenom dodatnog signala.

- FLAIR (*fluid attenuated inversion recovery*) – posebna varijanta IR tehnike snimanja u kojoj se signal vode potiskuje, ali na drugačiji način od klasičnih T1 snimaka. Rezultantne snimke su korisne pri otkrivanju promjena u moždanom tkivu (ožiljci, otoci tkiva, demijelinizacije, itd.).



Slika 22 – MRI snimka mozga koristeći tehniku FLAIR, [26]

- STIR (*short tau inversion recovery*) – varijanta T1 snimke u kojoj se potiskuje signal masti. Budući da T1 snimke sadrže većinom signale masti, rezultantne slike su vrlo tamne, što pogoduje prikazivanju metastaza, otoka, ožiljaka i ostalih sukulentnih tkiva.

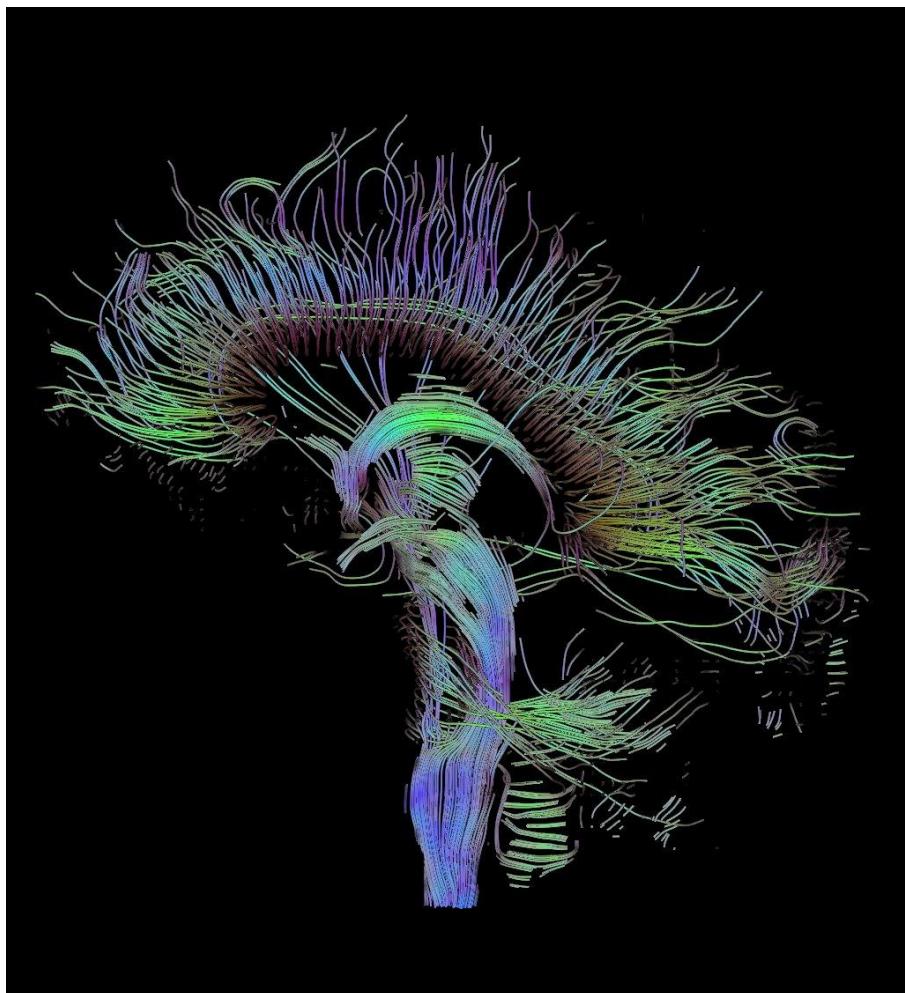
Tehnike korištenjem gradijenta:

- T2* - varijanta dobivanja T2 snimaka, no snimanje se vrši kada je više od 2/3 protona u relaksiranom stanju, uglavnom uz korištenje gradijenta. Koristi se kod skeniranja kostiju i zglobova.
- CISS (*constructive interference steady state*) – vrlo brza gradijentna metoda dobra kod snimanja brzih kretnji, primjerice rada srca.
- DWI (*diffusion weighted imaging*) – tehnika koja nastoji poništiti sav signal iz tkiva, nakon čega će ostati vidljiv samo signal molekula koje se kreću zbog

efekta difuzije. Zbog velike zahtjevnosti samo uređaji sa snažnim i brzim gradijentima mogu uspješno provoditi tehniku DWI. Često se koristi kod pronalaženja ishemičnog moždanog tkiva.

Ostale tehnike:

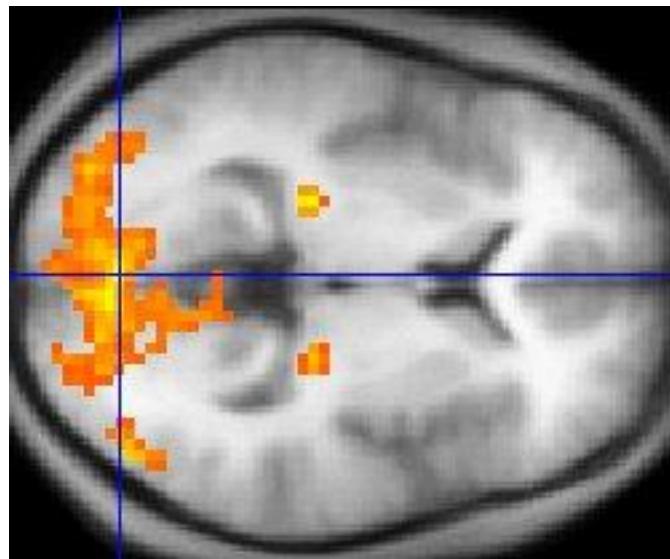
- DTI (*diffusion tensor imaging*) – tehnika koja snima difuziju uzduž neuronskih vlakana radi dobivanja podataka o toku snopova neurona.



- **Slika 23 – Traktografska rekonstrukcija neuralnih veza dobivena DTI načinom snimanja, [27]**

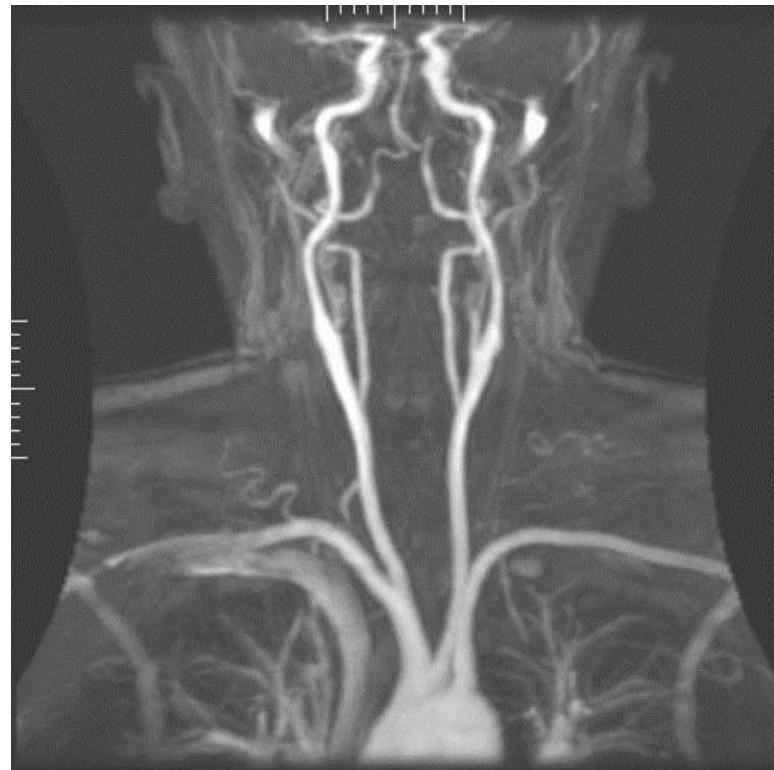
- MRS (MR spektroskopija) – analizom primljenih signala određuje se sastav molekula unutar analiziranog tkiva. Relativno rijetko se koristi.

- fMRI (funkcionalna magnetska rezonanca) – višestrukim snimanjem mozga određuju se razlike registriranih signala nastale zbog promjena u tkivu, što je posljedica korištenja mozga pri izvršavanju određenih zadataka.



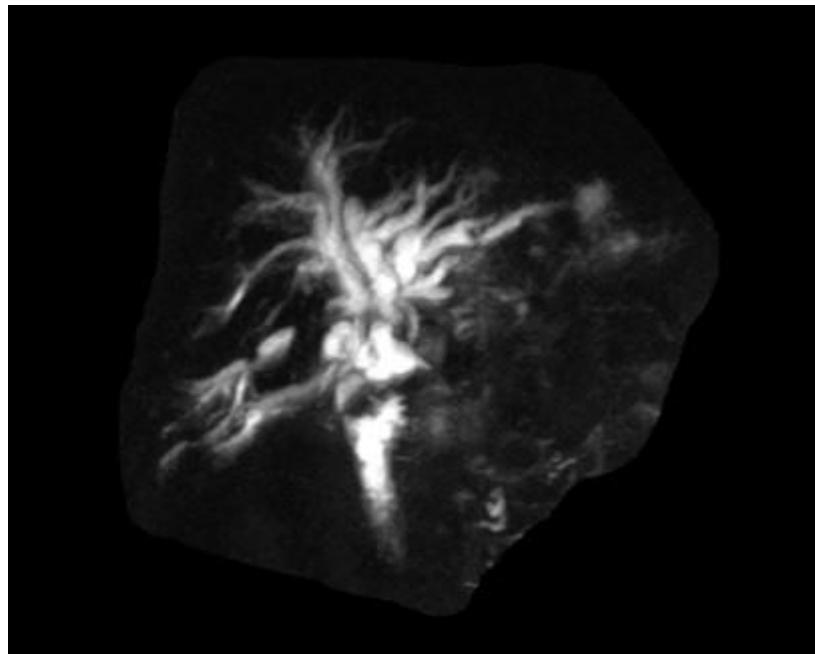
Slika 24 – Snimak mozga fMRI tehnikom, [26]

- MRA (MR angiografija) – tehnika prikaza krvnih žila, poglavito mozga i vrata.



Slika 25 – Primjer MR angiografije, [28]

-
- MRCP (*magnetic resonance cholecysto-pancreatography*) – korištenje T2 snimaka za prikaz žučnih vodova.



**Slika 26 – Snimka proširenih žučnih vodova, dobivena MRCP tehnikom,
[26]**

[23][24][25][26][27][28]

3.3. Zapis podataka

Nakon što je skeniranje pacijenta obavljeno dobivene medicinske podatke potrebno je spremiti na praktični i organizirani način, odnosno zapis podatka treba poštivati neki format. Postoji velik broj različitih načina zapisa, no većina nema vrlo raširenu uporabu. Svakako najpopularniji format datotečnog zapisa danas je DICOM, o kojemu će biti najviše govora u ovom poglavlju.

3.3.1. DICOM

Najrašireniji standard za pohranu podataka u medicinskoj vizualizaciji je DICOM (engl. *digital imaging and communications in medicine*). To je vrlo opsežni standard koji formalno definira većinu procedura u radu s digitalnim medicinskim podacima: rukovanje, skladištenje, ispis i prijenos podataka. DICOM pokriva

definiciju formata podataka i protokol za mrežno komuniciranje – aplikacijski protokol baziran na protokolu TCP/IP.

Američka organizacija NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) je vlasnik prava na DICOM format, koji je razvijen od strane *DICOM Standards Committee*, dio NEMA-e. Trenutna verzija DICOM-a je treća po redu, objavljena 1993., no s nekoliko manjih promjena koje su naknadno dodane u standard.

Definicija standarda DICOM podijeljena je u relativno velik broj dijelova koji su međusobno nezavisni, no dobro povezani.

Tablica 1 – Dijelovi standarda DICOM, [30]

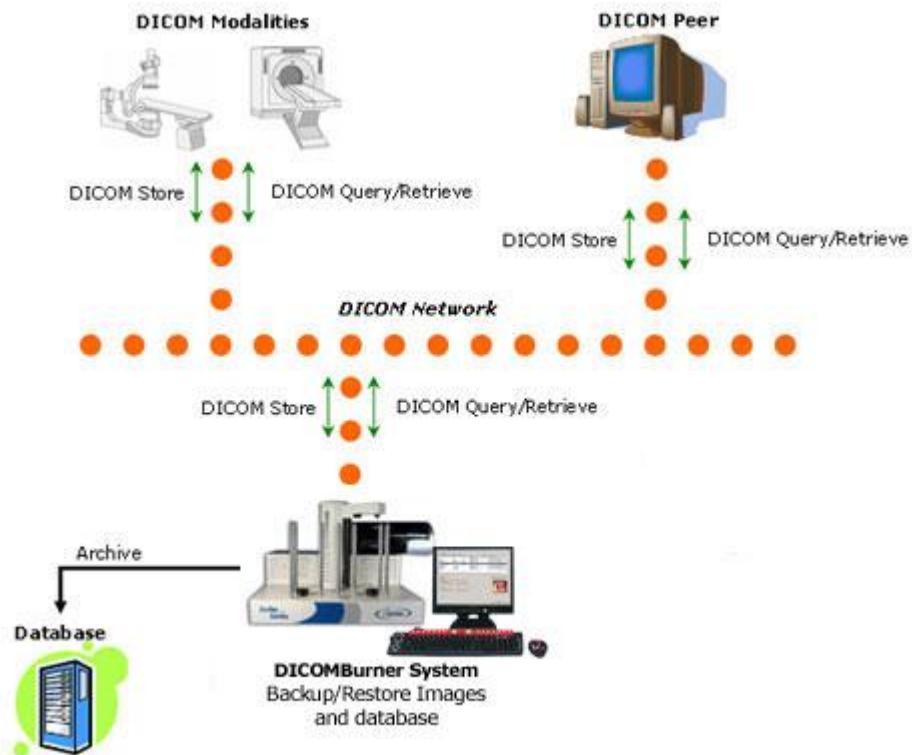
| Oznaka | Naziv | Status |
|---------|--|---------|
| PS 3.1 | Uvod i pregled | Aktivno |
| PS 3.2 | Usklađenost standardima | |
| PS 3.3 | Definicije informacijskih objekata | |
| PS 3.4 | Specifikacije poslužne klase | |
| PS 3.5 | Struktura i kodiranje podataka | |
| PS 3.6 | Rječnik podataka | |
| PS 3.7 | Razmjena poruka | |
| PS 3.8 | Podrška mrežne komunikacije za razmjenu poruka | |
| PS 3.9 | Komunikacijska podrška za razmjenu poruka od točke do točke (engl. <i>Point-to-Point</i>) | Ukinuto |
| PS 3.10 | Pohrana medija i datotečni format za razmjenu podataka | Aktivno |
| PS 3.11 | Aplikacijski profili za pohranu medija | |
| PS 3.12 | Funkcije pohrane i formati medija za razmjenu podataka | |
| PS 3.13 | Upravljanje ispisom u komunikacijskoj podršci od točke do točke | Ukinuto |
| PS 3.14 | Standardna funkcija prikaza u sivim nijansama (engl. <i>grayscale</i>) | Aktivno |

| | | |
|---------|---|--|
| PS 3.15 | Sigurnosni profili i profili upravljanja sustavom | |
| PS 3.16 | Resursi za označavanje sadržaja | |
| PS 3.17 | Opisne informacije | |
| PS 3.18 | Mrežni pristup postojanim DICOM objektima | |

U DICOM formatu sve informacije se spremaju grupirane u skupove podataka (engl. *datasets*), što znači da će se slikovni podaci nalaziti zajedno s metapodacima (npr. ime i ID pacijenta, datum, itd.). Time je osigurano da se glavni podaci nikad neće odvojiti od informacija koje ih opisuju, slično kao što se u slikovnom formatu JPEG podaci o slici nalaze zajedno s EXIF oznakama (engl. *tags*) poput naziva kamere i ISO vrijednosti.

Podatkovni objekt u DICOM formatu sadržava razne atributе; većina njih su već spomenuti metapodaci, no jedan specijalni atribut predstavlja slikovne podatke, tj. vrijednosti piksela u medicinskoj snimci. Iako se metapodaci mogu smatrati kao zasebnom cjelinom koja je zapravo zaglavljene datoteke (engl. *header*), ne postoji никакve praktične razlike između slikovnih podataka i informacijskih atributa.

Jedna DICOM datoteka može sadržavati samo jedan atribut sa slikovnim vrijednostima. Za većinu modaliteta, to znači da će sadržavati jedinstvenu sliku. Ipak, postoji mogućnost zapisa višestrukih okvira (engl. *frames*) unutar tog atributa.



Slika 27 – Dijagram usluga pokrivenih standardom DICOM, [33]

DICOM standard omogućuje velik broj raznih usluga, od kojih većina uključuje mrežni prijenos podataka. Sam format podatka je kasniji i relativno manje važan dodatak standardu. Neke od važnijih usluga su:

- Skladištenje (engl. *store*) – koristi se za slanje slika ili drugih postojanih objekata prema vanjskim sustavima.
- Obveza skladištenja (engl. *storage commitment*) – usluga koja potvrđuju da je neka slika trajno i sigurno spremljena na nekom uređaju. To obično uključuje ili dodatno spremanje na redundantnom disku ili spremanje kopije na drugom mediju (npr. CD).
- Upit/dohvat (engl. *query/retrieve*) – omogućuje radnoj stanici da pronađe listu slika ili sličnih objekata i dohvati ih s vanjskog sustava.
- Modalitet radne liste (engl. *modality worklist*) – organizacijski alat koji dohvaća podatke o pacijentima i nadolazećim pregledima.
- Ispis – usluga koja šalje slike prilagođenom DICOM printeru.

- Neumreženi podaci (engl. *off-line media*) – definicija u 10. dijelu DICOM standarda: PS 3.10; opisuje kako pohraniti podatke izvan sustava. Ovo je zapravo definicija datotečnog formata u užem smislu. Stroga definicija ograničava ime datoteka na maksimalno 8 znakova; datoteke obično imaju ekstenziju *.dcm*, no to nije nužno. Prema standardu, kolekcija DICOM datoteka mora sadržavati i opis podatkovnog direktorija: *DICOMDIR* datoteka u kojoj se nalaze dodatne informacije o organizaciji relevantnih datoteka.

DICOM standard pokriva sve važnije digitalne metode korištene u medicinskoj vizualizaciji, koje se nazivaju modalitetima. Moguća područja primjene DICOM sustava su sljedeći modaliteti:

Tablica 2 – Modaliteti standarda DICOM, [30]

| Modalitet | Opis | Status |
|-----------|--|---------------|
| BI | Biomagnetsko oslikavanje (engl. <i>Biomagnetic Imaging</i>) | Aktivno |
| CD | Dopplerov tok boja (engl. <i>Color Flow Doppler</i>) | Ukinuto 2008. |
| CR | Računalna radiografija (engl. <i>Computed Radiography</i>) | Aktivno |
| CT | Računalna tomografija | |
| DD | Duplex Doppler | Ukinuto 2008. |
| DG | Diafanografija (engl. <i>Diaphanography</i>) | Aktivno |
| DX | Digitalna radiografija | |
| EC | Eho kardiografija (engl. <i>Echo cardiology</i>) | Ukinuto |
| EM | Elektronski mikroskop Electron Microscope | Aktivno |
| ES | Endoskopija | |
| GM | Općeniti mikroskop | |
| LS | Površinski laserski sken | |
| MA | MR angiografija | Ukinuto |

| | | |
|----|--|---------------|
| MG | Mamografija | Aktivno |
| MR | Magnetska rezonanca | |
| MS | MR spektroskopija | Ukinuto |
| NM | Nuklearna medicina | Aktivno |
| OT | Ostalo | |
| PT | PET (engl. <i>Positron Emission Tomography</i>) | |
| RF | Radio fluoroskopija | |
| RG | Radiografsko oslikavanje | |
| RT | Terapija ozračivanjem | |
| SC | Sekundarno oslikavanje (engl. <i>Secondary Capturing</i>) | |
| SM | Engl. <i>Slide Microscopy</i> | |
| ST | Engl. <i>Single-Photon Emission Computed Tomography</i> | Ukinuto 2008. |
| TG | Termografija | Aktivno |
| US | Ultrazvuk | |
| VL | Vidljiva svjetlost | |
| XA | Rendgenska angiografija | |
| XC | Vanjska kamera (fotografija) | |

[30][31][32][33]

3.3.2. Analyze

Analyze je biomedicinski datotečni format koji prati istoimeni programski paket namijenjen višedimenzijском prikazu, obradi i mjerenu multimodalnih biomedicinskih slika. Razvijen je u institutu BIR (*Biomedical Imaging Resource*), smještenom u američkoj klinici Mayo. To je komercijalni paket, trenutno u verziji

7.5, koji se najčešće koristi za potrebe magnetske rezonance, računalne tomografije, PET skenova i funkcionalne neurovizualizacije.

Između ostalog, format Analyze može se koristiti za zapis 3D volumena baziranih na vokselima. Jedan Analyze podatkovni objekt sastoji se od dvije datoteke:

- Slikovni podaci – *.img* ekstenzija
- Zaglavljje s metapodacima – *.hdr* ekstenzija

Datoteka sa slikovnim podacima najčešće su jednostavno formatirani i sadrže podatke o pikselima bez kompresije.

Zaglavljje je organizirano poput računalnog kôda u jeziku C; zbog toga zaglavljje je vrlo fleksibilno te mu se mogu dodavati nove strukture i korisnički definirani tipovi podataka.

[34][35]

3.3.3. Klasični slikovni formati

Iako se većina programa u domeni medicinske vizualizacije oslanja na korištenje jednog ili više formalno definiranih formata zapisa, za neke jednostavne primjene ponekad su dovoljno dobri standardni nemedicinski formati za zapis slika.

Najčešći standardni formati rasterskog zapisa slike:

- BMP – može zapisivati digitalne 2D slike proizvoljnih dimenzija i rezolucije, crno-bijelo ili u boji.
- JPEG – vjerojatno najpoznatiji slikovni format zapisa s gubicima kvalitete (engl. *lossy*). Stupanj kompresije je korisnički definiran, što znači da se može odrediti ravnoteža između kvalitete i veličine slike. U medicinskoj vizualizaciji ovaj se format često koristi za izvoz slika. No, budući da JPEG uzrokuje gubitak dijela informacije, njegovo korištenje se ne preporuča u situacijama kad će se izvezena slika koristiti za daljnju analizu ili proučavanje.

- GIF – Kao i JPEG, često se koristi za izvoz slika iz medicinskih programa. Omogućuje skladištenje niza sličica (engl. *frames*) u obliku animacije.
- TIFF – Ponekad korišten kao uvozni i izvozni format. Najčešće se koristi kao 32-bitna nekomprimirana rasterska mapa (engl. *bitmap*), no podržava i kompleksnije strukture.

[36]

3.3.4. RAW

Najjednostavniji zapis podataka je u sirovom nekomprimiranom obliku zvanom RAW. U kontekstu fotografije, digitalne kamere često podržavaju snimanje u RAW formatu, koji sadrži slikovne podatke s minimalnom obradom. Takvi podaci se ne mogu odmah iskoristiti za ispis fotografije, niti se mogu otvoriti u klasičnim rasterskim uređivačima slika. Njihova prednost je što sadrže veliku količinu informacija o slici, primjerice veći dinamički raspon boja nego slika u JPEG formatu.

U kontekstu medicinske vizualizacije RAW format se može koristiti i za zapis volumnih podataka. Datoteke tog tipa ne sadrže nikakvo zaglavlje niti oznake s metainformacijama; one se sastoje samo od podataka koji opisuju elemente volumena (voksele), u zapisu bez kompresije. Veličina datoteke bit će umnožak dužine i širine poprečnog presjeka (slajsa), broju poprečnih presjeka po volumenu te broju bajtova po pikselu.

[36]

4. Vizualizacija

Nakon što su medicinski podaci snimljeni, korištenjem neke od digitalnih tehnologija poput CT-a ili MRI-ja, te pohranjeni u nekom podatkovnom formatu (najčešće DICOM) preostaje zadatak prikaza tih informacija. Dobivena slika može biti iscrtana u 2D ili 3D načinu, te se u nekim slučajevima može i animirati. Ovo poglavlje opisuje najčešće korištene procedure za ostvarivanje ciljeva medicinske vizualizacije, s naglaskom na sustav VTK (*visualization toolkit*) – programski paket otvorenog kôda namijenjen korištenju u području računalne grafike, obradi slika i vizualizaciji. Također će biti opisan rad u nekim aplikacijama koji koriste VTK za prikaz podataka; ti sustavi su visoke razine te omogućavaju učinkovit i brz rad te grafičko programiranje s modulima raznih namjena.

4.1. Metode 2D vizualizacije

Budući da su skupovi podataka najčešće organizirani kao skupina poprečnih presjeka (slajsova) prikaz u dvije dimenzije je najjednostavniji način grafičke prezentacije informacija.

4.1.1. Reprezentacija podataka

Podaci korišteni u vizualizaciji su diskretni, što je posljedica korištenja digitalnih računala za dobivanje, analizu i reprezentaciju podataka – mjerjenje i uzorkovanje informacije se obavlja korištenjem konačno mnogo brojeva. Diskretna priroda podataka predstavlja relativno velik problem: u diskretiziranom skupu podataka, često je potrebno odrediti vrijednost u proizvoljnoj točki, koja se nalazi između izmjerениh vrijednosti.

Najčešće korišteno rješenje tog problema je interpolacija. Odabere se proizvoljna funkcija odnosa susjednih vrijednosti – najčešće linearna funkcija, no ona može biti kvadratna, kubna, splajn, itd. – koja se iskoristi za predviđavanje vrijednosti u rasponu između dviju poznatih točaka.

Sljedeća važna karakteristika podataka je organizacija – struktura podataka može biti pravilna ili nepravilna. U prvom slučaju sve su točke jednako razmaknute

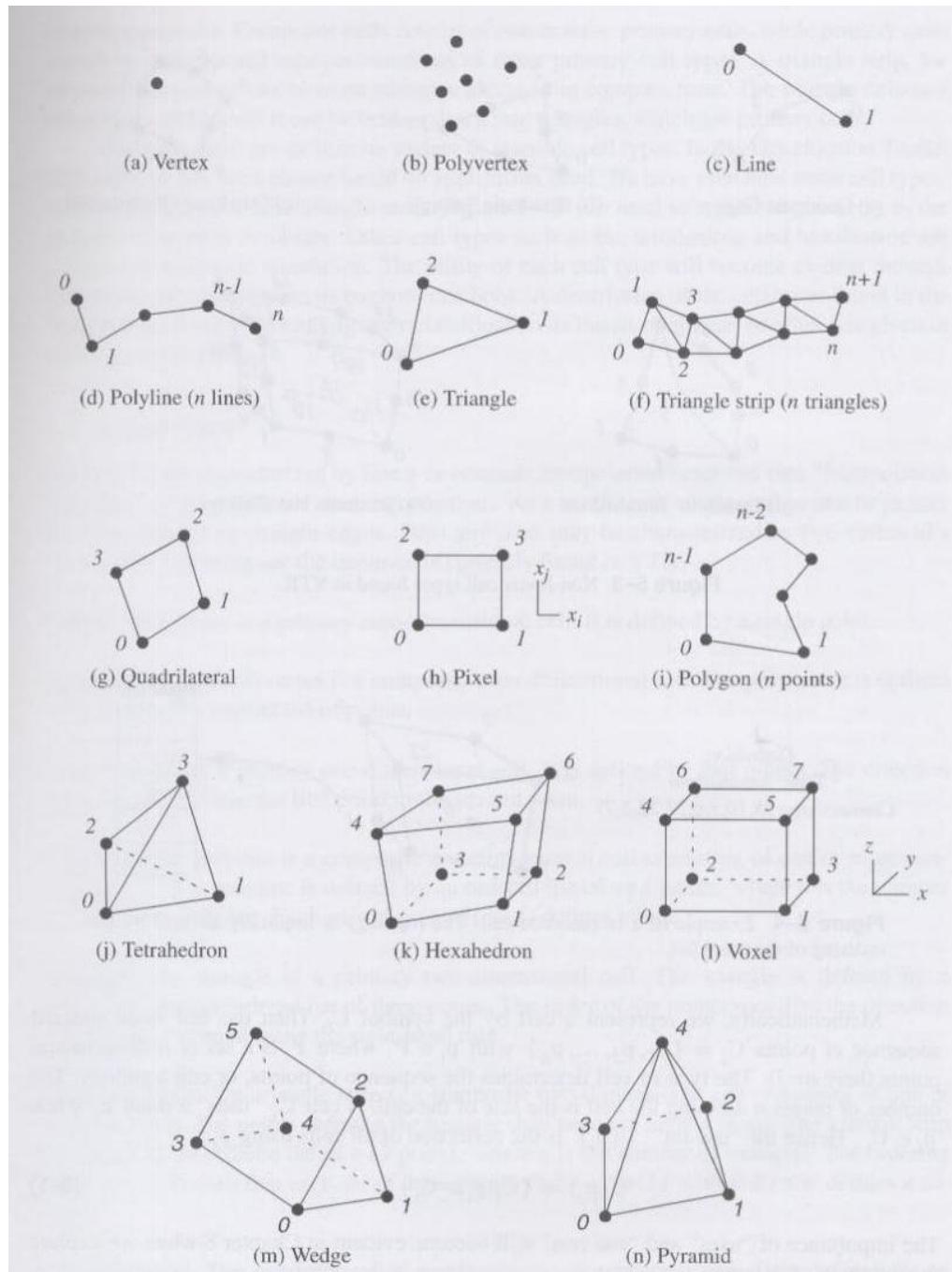
jedne od drugih (npr. pravokutna mreža), što ima prednost u tome da se ne moraju pamtiti koordinate točaka, već samo početna lokacija, međusobna udaljenost između točaka i ukupan broj točaka. U nepravilnoj strukturi podataka položaj svake točke mora biti eksplisitno određen; prednost takve organizacije je što se može prilagođavati – u područjima u kojima se vrijednost podataka brzo mijenja može se postaviti veći broj točaka nego u monotonijim, jednostavnijim regijama.

Najopćenitiji način pohrane informacije u sustavu VTK je podatkovni objekt (engl. *data object*) – kolekcija podataka bez strukture. Kao takvi, podatkovni objekti su od male koristi dok se na njih ne primijeni neki način organizacije.

Skup podataka (engl. *dataset*) je organizirani podatkovni objekt s formalnom strukturu i pridruženim atributima. Osnovni tip skupa podataka je apstraktni oblik pohrane; većina algoritama u sustavu VTK izvršavaju operacije na nekoj konkretnoj implementaciji (podklasi) skupa podataka. Ovakva struktura sastoji se od dva dijela:

- Topologije – skup svojstava koji se ne mijenjaju primjenom geometrijskih transformacija (translacija, rotacija i neuniformno skaliranje).
- Geometrije – predstavlja instancu topologije, odnosno konkretne položaje u 3D prostoru.

Na primjer, neki skup podataka može, u topološkom smislu, biti „trokut“; definiranjem koordinata tri točke određujemo geometriju tog objekta. U VTK modelu, skup podataka sastoji se od ćelija, koje predstavljaju topologiju, i točaka, koji definiraju geometriju. Osim tih osnovnih elemenata, skup podataka može sadržavati i dodatne podatkovne atribute. To su informacije pridruženi geometriji ili topologiji, primjerice vrijednost tlaka zraka u nekoj točki. Podatkovni atributi su obično skalari, vektori, normale, teksturne koordinate i tenzori.

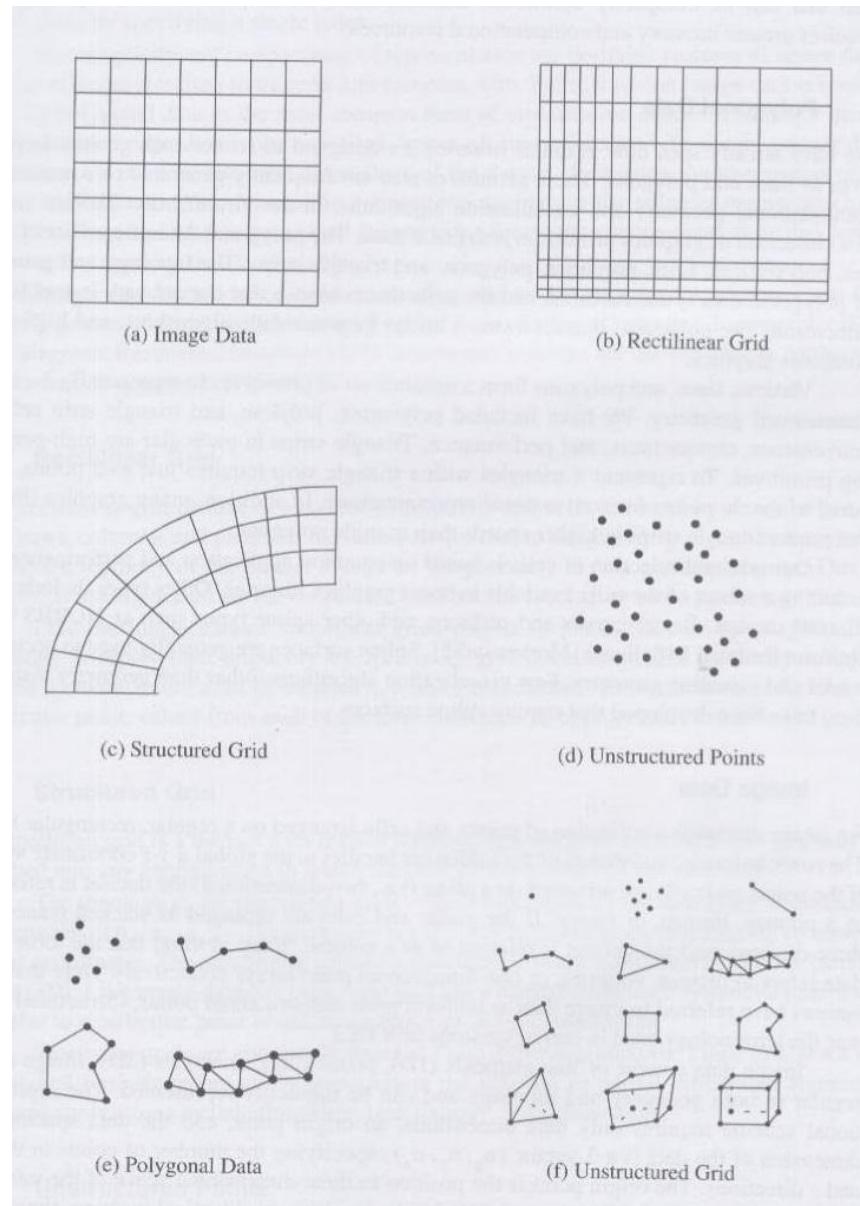


Slika 28 – Vrste ćelija u sustavu VTK, [1]

Organizacija skupa podataka kao kolekcija ćelija i točaka je izravna posljedica diskretnе prirode informacije. Točke su smještene u lokacijama gdje je poznata vrijednost informacije, a ćelije omogućuju interpolaciju između točaka.

U sustavu VTK postoji pet implementacija skupa podataka:

- vtkImageData – najjednostavnija i najkompaktnija implementacija skupa podataka. Ćelije i točke predstavljene su implicitno specificiranjem dimenzija, razmaka među podacima i ishodištem. Ova struktura može reprezentirati 1D liniju, 2D sliku ili 3D volumen.
- vtkRectilinearGrid – ova klasa posjeduje pravilnu topologiju – određenu specificiranjem dimenzija skupa podataka na x, y i z osima – te „polupravilnu“ geometriju – definiranu preko 3 niza koordinatnih vrijednosti raspoređenih na XYZ osima. Kombiniranjem tih 3 niza koordinatnih vrijednosti moguće je odrediti položaj bilo koje točke u skupu podataka.
- vtkStructuredGrid – kao i vtkImageData, topologija ove klase je pravilna i definirana određivanjem dimenzija u topološkom koordinatnom sustavu. Razlikuje se od vtkImageData u geometrijskom dijelu; koordinate točaka ovdje se odnose na globalni koordinatni sustav.
- vtkPolyData – posjeduje nepravilnu topologiju; i topologija i geometrija moraju biti eksplicitno definirane. Klasa sadrži četiri nezavisne liste koje obuhvaćaju sljedeće tipove ćelija: točke, linije, poligone i nizove trokuta (engl. *triangle strips*)
- vtkUnstructuredGrid – najfleksibilnija klasa; slično formirana kao vtkPolyData, osim što može sadržavati ćelije bilo kojeg tipa, a ne samo osnovna četiri kao u prethodnoj klasi.

**Slika 29 – Tipovi skupova podataka, [1]**

[1, str:107–129]

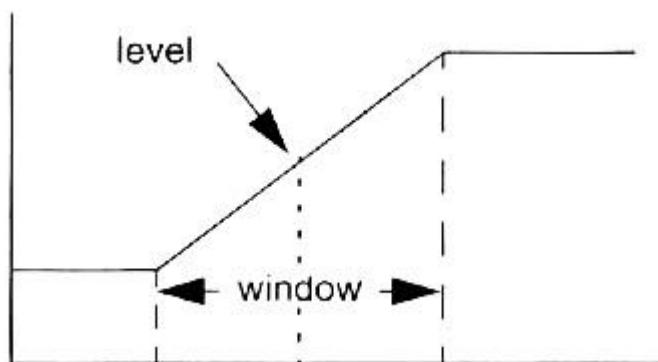
4.1.2. IsCRTavanje slike

2D medicinska vizualizacija u sustavu VTK najčešće se ostvaruje jednim od dva jednostavnih načina. Prva metoda koristi klasu `vtkImageViewer`, namijenjenu praktičnom prikazu slika. `vtkImageViewer` zapravo upravlja nekolicinom internih klasa:

- `vtkImageWindow`

- vtkImager
- vtkActor2D
- vtkImageMapper

Tipična procedura korištenja vtkImageViewer klase uključuje sljedeće korake: definiranje ulaznih podataka, odabir željenog poprečnog presjeka (z-slajs) te specificiranje izlaznog prozora i njemu prilagođene vrijednosti razine prijenosne (transferske) funkcije (engl. *level transfer function value*).



Slika 30 – Razina transferske funkcije, [2]

Transferska funkcija utjecat će na izgled resultantne slike. Nagib funkcije određuje vrijednost kontrasta slike; širina prozora (engl. *window*) određuje koje vrijednosti će se prikazati na ekranu. Sve vrijednosti izvan okvira prozora će biti postavljene na rubne vrijednosti prozora.

Drugi način prikaza slike je pomoću klase vtkImageActor, koja je korisna u slučajevima kada je potrebno prikazati 2D sliku u prozoru namijenjenom 3D iscrtavanju. Slika se prikazuje stvaranjem poligona čija je veličina jednaka veličini slike na kojega se zaliđe slika koristeći sklopovsko preslikavanje (engl. *hardware mapping*) teksture. Na većini platforma dobivenu će sliku biti moguće interaktivno rotirati, pomicati i zumirati. Prednost korištenja 3D prozora je što se u njemu mogu nalaziti višestruke slike zajedno s opcionalnim 3D anotacijama.

[2, str:127–128]

4.1.3.2D vizualizacija u sustavu VTK

Sustav VTK podržava nekoliko različitih platformi za izvršavanje svojih metoda. U sklopu ovog diplomskog rada koristilo se programsko okruženje Microsoft Visual Studio 2010, programski jezik C++ te najnovija verzija VTK-a (5.6.1).

Podaci koji su korišteni preuzeti su iz dva izvora:

- Podaci u DICOM formatu u nekoliko modaliteta, snimljeni u zagrebačkoj poliklinici NEURON.
- Slobodno raspoloživi primjeri datoteka u DICOM formatu raznih namjena i modaliteta (većinom MR i CT)¹.

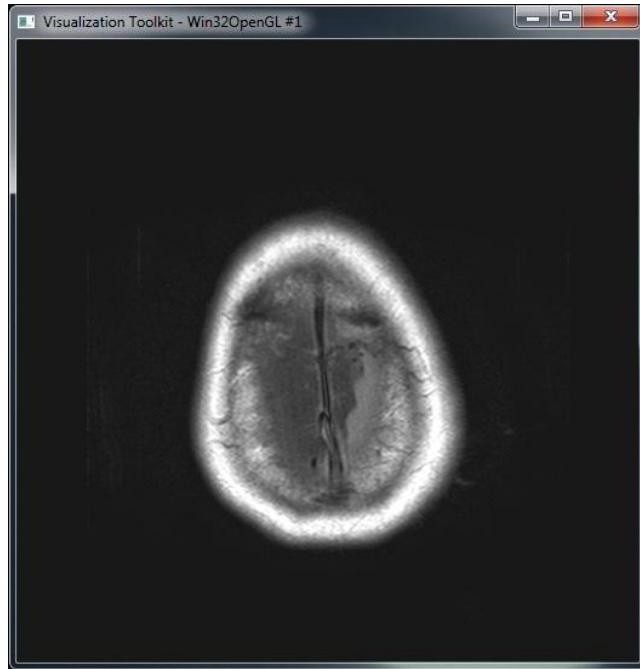
Podaci se učitavaju korištenjem klase `vtkSmartPointer` s predloškom (engl. *template*) `vtkDICOMImageReader`. Klasa se instancira te joj se podesi ulaz, ili definiranjem mape na računalu u kojoj se nalazi grupa DICOM datoteka, ili specificiranjem puta do jedne DICOM datoteke. Pozivom metode `Update()` klasa će učitati specificirane podatke, nakon čega se pokazivač koji ukazuje na skup podataka može preuzeti pomoću funkcije `GetOutput()`.

Za 2D vizualizaciju koristi se klasa `vtkImageViewer2`, koja se takođerinstancira kao predložak klase `vtkSmartPointer`. Povezivanje ove klase s klasom koja upravlja ulaznim podacima vrši se pozivom metode `SetInput()`, kojoj se kao parametar predaje pokazivač na podatke generiran iz klase `vtkDICOMImageReader`.

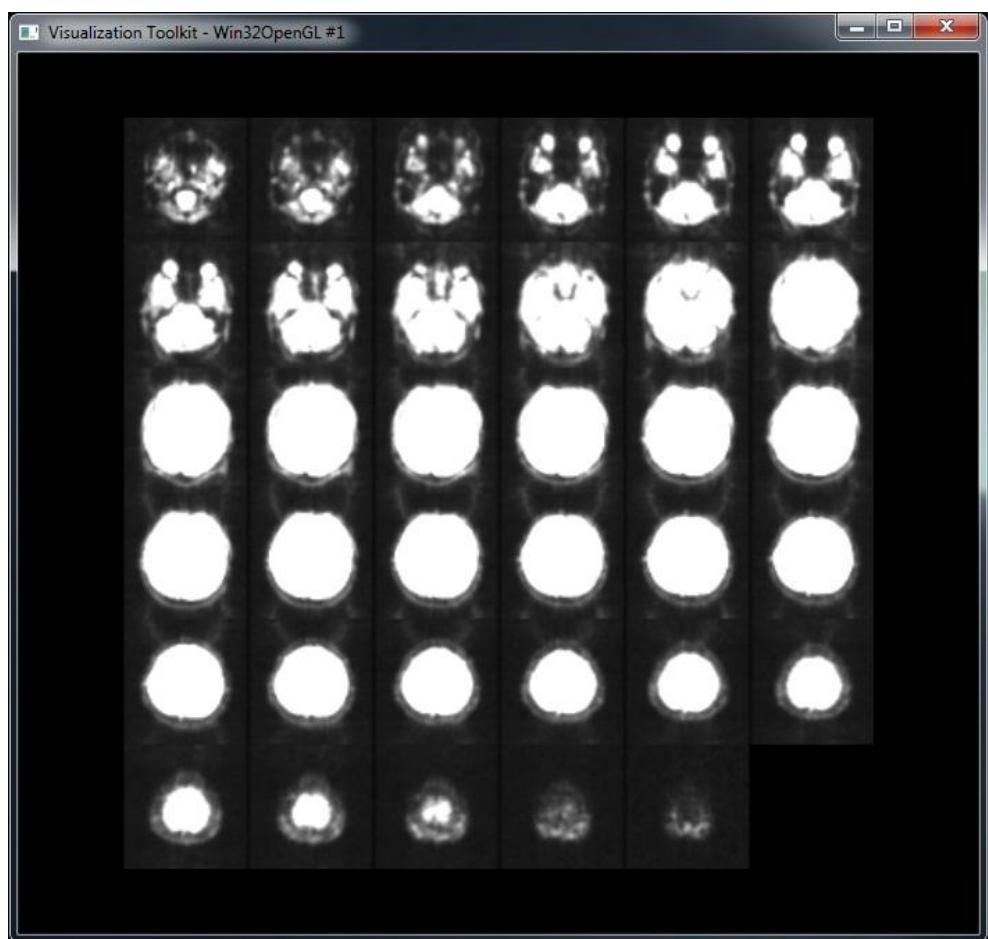
Radi lakše interakcije s resultantnim prikazom koristi se još jedna klasa – `vtkRenderWindowInteractor` – koja korisniku pruža općenitu interaktivnu funkcionalnost poput registriranja pritisaka tipki i pomicanja miša. Klasa se jednostavno poveže s prikazom pozivom članske funkcije `SetupInteractor()` u klasi `vtkImageViewer2`.

Konačno, slika se može prikazati pozivom funkcije `Render()`. Korisnik može utjecati na prikaz slike pritiskom miša na prozor i pomicanjem u nekom smjeru. Pomicanje miša lijevo-desno će smanjiti ili povećati kontrast, dok će pomicanje gore-dolje utjecati na svjetlinu dobivene slike.

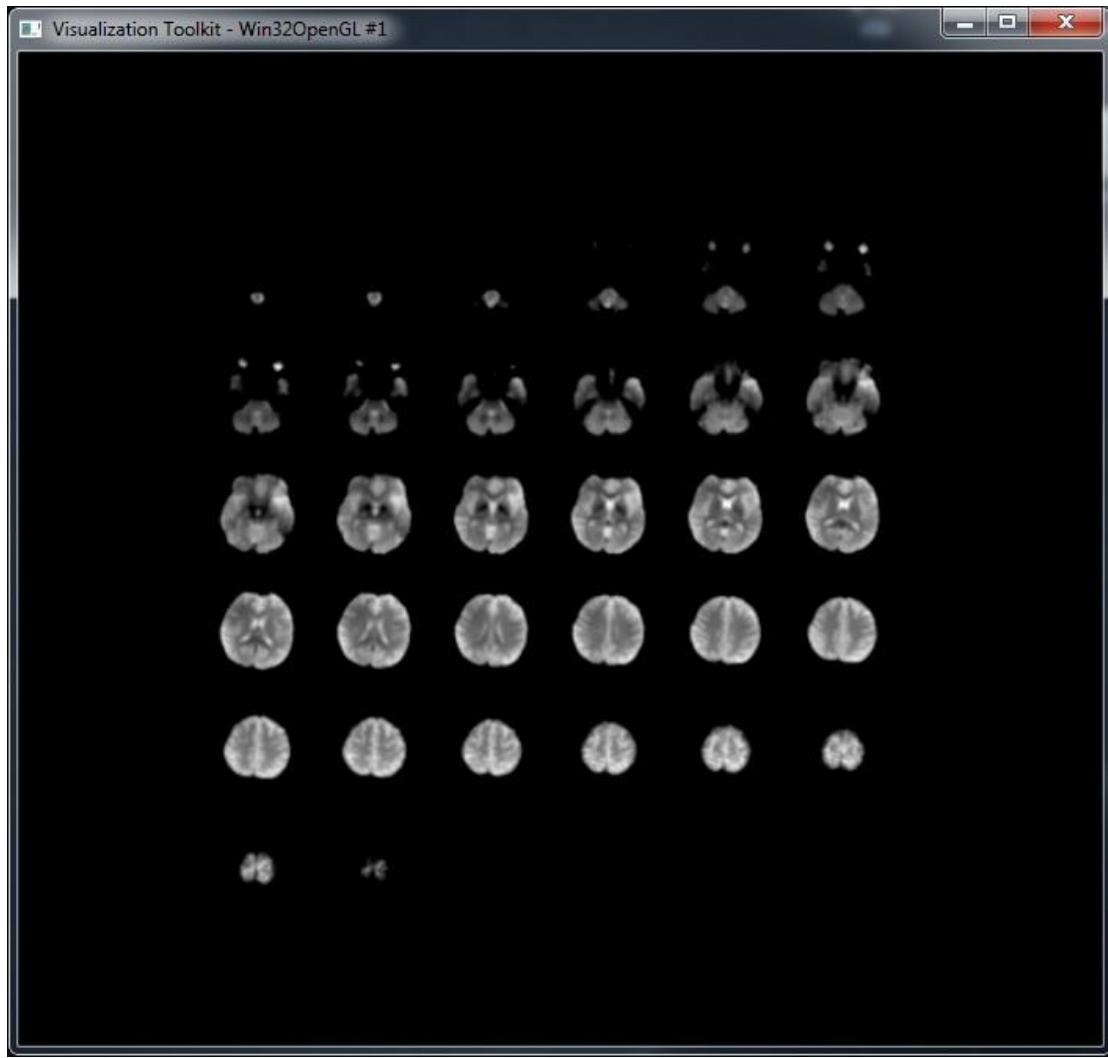
¹ <http://pubimage.hcuge.ch:8080/>



Slika 31 – 2D vizualizacija MRI snimke glave, aksijalni poprečni presjek



Slika 32 – Vizualizacija višestrukih MRI (koronalnih) poprečnih presjeka ljudske glave



Slika 33 – Vizualizacija s pojačanim kontrastom i smanjenom svjetlinom

4.1.4.2D vizualizacija uz korištenje alata MeVisLab

U području medicinske vizualizacije, grafičko programiranje je vrlo popularan način obrade i prikaza rezultata. Umjesto pisanja programskog kôda, aplikacije se kreiraju dodavanjem i povezivanjem raznih vrsta modula.

MeVisLab je aplikacijski sustav namijenjen procesuiranju medicinskih slika i znanstvenoj vizualizaciji. Aktivno se razvija od 1993.; 2007. kupila ga je njemačka tvrtka MeVis Medical Solutions AG. Kao platforma za razvijanje medicinskih aplikacija, MeVisLab omogućuje brzu integraciju i testiranje različitih algoritama.

Sustav ima na raspolaganju vrlo velik broj modula: više od 600 modula baziranih na sustavu VTK i preko 200 ITK modula – ITK je sustav otvorenog kôda

namijenjen obradi i segmentaciji slika (*Insight Segmentation and Registration Toolkit*).

Prije učitavanja podataka iz DICOM datoteka potrebno je datoteke konvertirati u format koji će MeVisLab razumijeti.

Za dobivanje 2D slike potrebno je stvoriti mrežu od 2 modula:

- *Locallmage* – modul za učitavanje podataka; prima kao argument put do datoteke s podacima.
- *View2D* – izvršava osnovni prikaz 2D slike. Uz sliku su prikazane i najvažnije metainformacije poput rednog broja poprečnog presjeka i modaliteta.

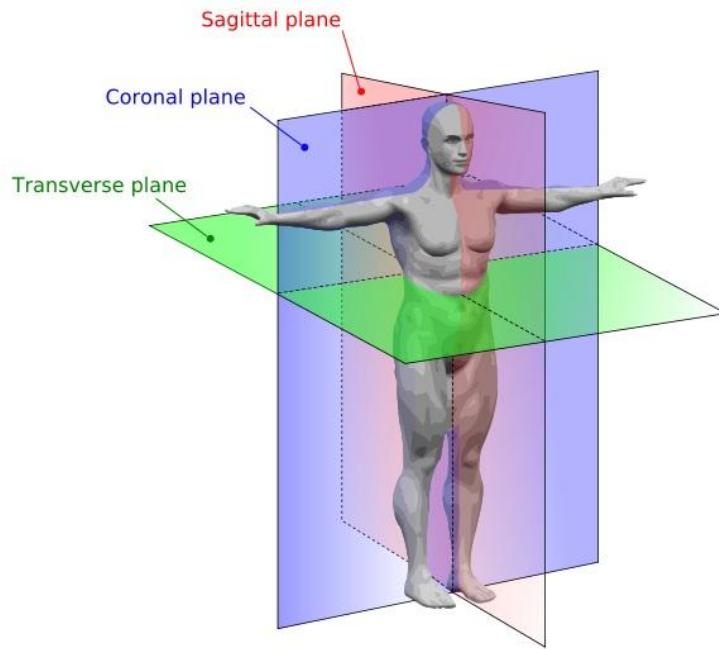
Ukoliko se učitani skup podataka sastoji od više poprečnih presjeka, oni se mogu izmjenjivati korištenjem kuglice miša ili tipkama gore-dolje.



Slika 34 – Vizualizacija dobivena uporabom modula View2D

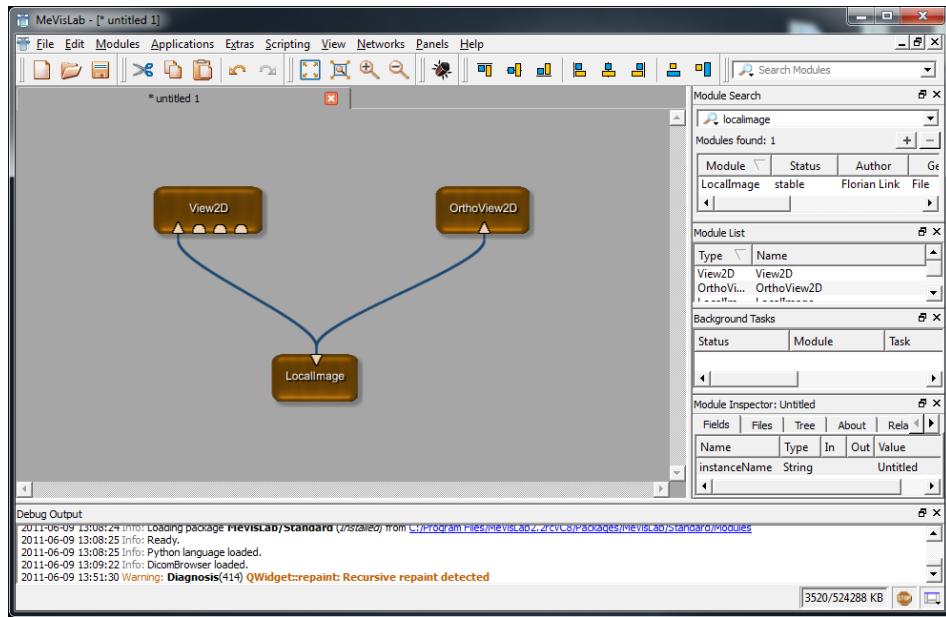
Skup podataka s više poprečnih presjeka se može bolje i efikasnije prikazati korištenjem modula OrthoView2D. Taj modul može istodobno prikazivati tri vrste poprečnih presjeka generiranih iz skupa podataka:

- Aksijalni (engl. *axial* ili *transverse*)
- Koronalni
- Sagitalni

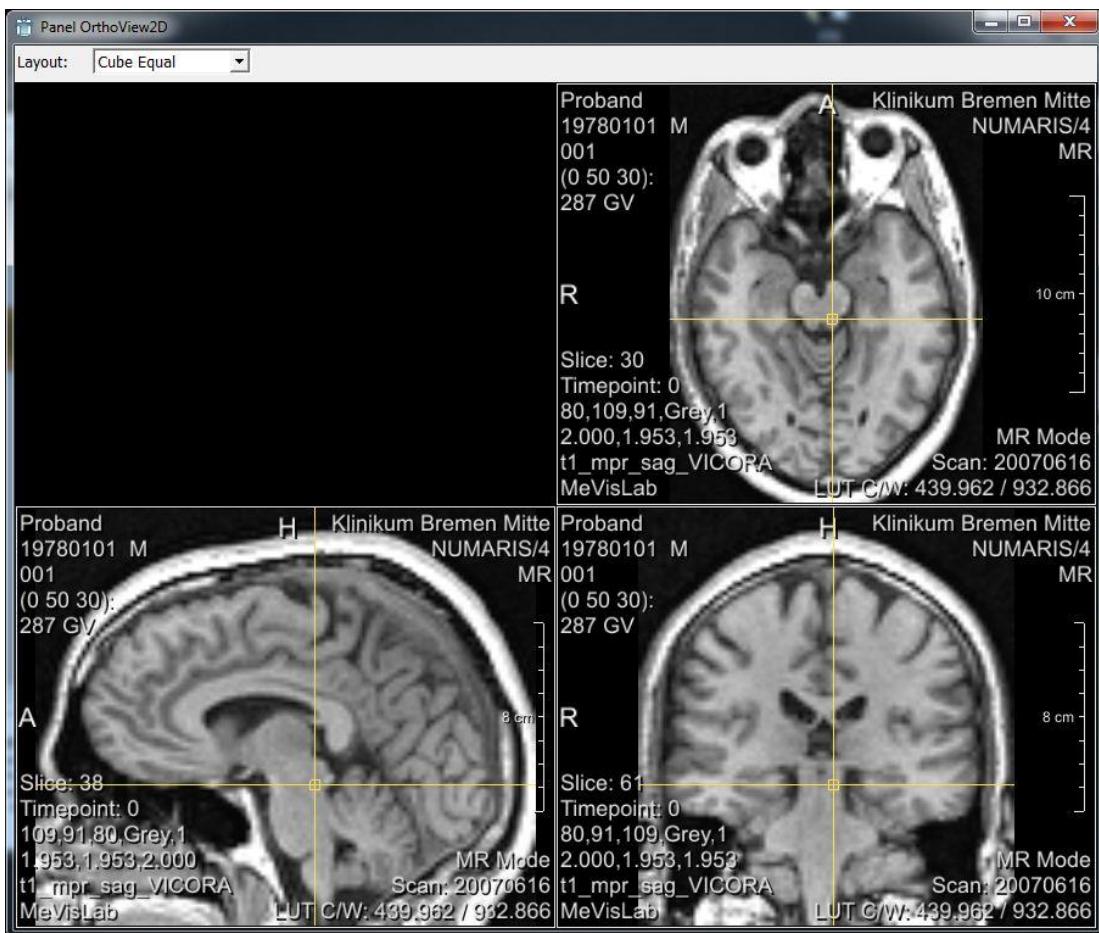


Slika 35 – Tri vrste poprečnih presjeka, [39]

Interakcijom s dobivenim prikazom korisnik može mijenjati prikazani poprečni presjek. Primjerice, pomicanje markera koronalnog prikaza prema dolje (negativni smjer Y-osi) uzrokovat će i vertikalno pomicanje markera na sagitalnom prikazu (uz nepromjenjenu sliku) te promjenu aksijalne slike (aksijalnog poprečnog presjeka).



Slika 36 – Primjer mreže modula u sustavu MeVisLab

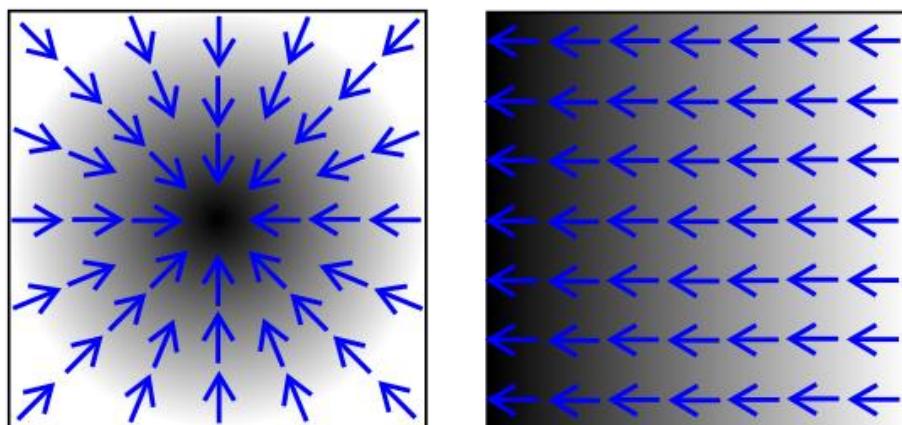


Slika 37 - Vizualizacija dobivena uporabom modula OrthoView2D

4.1.5. Obrada slikovnih podataka

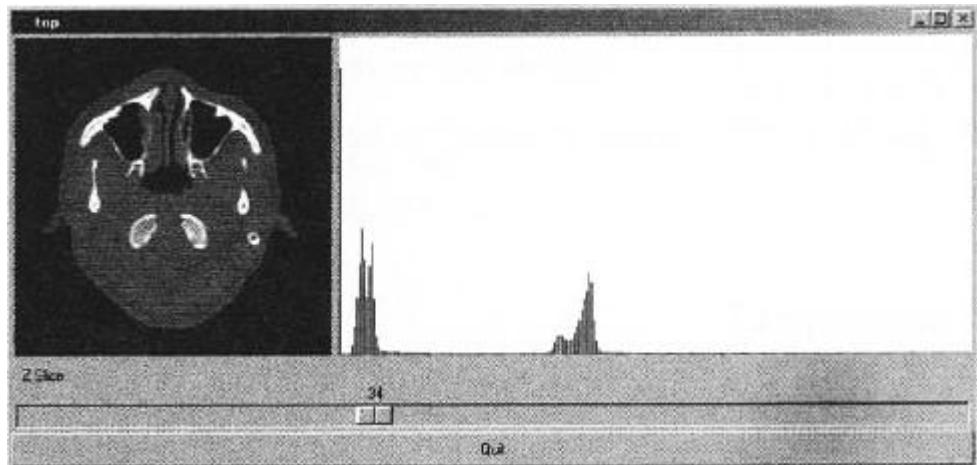
U sklopu sustava VTK postoji velik broj različitih algoritama, filtera i metoda koje služe poboljšavanju prikaza podataka, ekstrahiranju dodatnih i kvalitetnijih informacija, itd.

1. Gradijent – uz pomoć klase `vtkImageGradient` moguće je primijeniti filter koji računa gradijent neke slike ili volumena. Rezultantni gradijent može biti 2D ili 3D. Računanje gradijenta obavlja se usporedbom središnjih razlika, odnosno kod računanja vrijednosti nekog piksela promatraju se njegovi susjedni pikseli. Budući da rubni pikseli slike nemaju susjede na svim stranama, javlja se problem. Ukoliko se uključi opcija `HandleBoundaries`, gradijent će se izračunati za rubne piksele s modificiranim algoritmom; ukoliko je ta opcija isključena, rubni pikseli će se zanemariti i rezultantna slika biti nešto manja od originalne.



Slika 38 – Primjeri gradijenta u slikama, [37]

2. Histogram – klasa `vtkImageAccumulate` je filter koji proizvodi općenite histograme – vizuelne reprezentacije distribucije podataka – do četiri dimenzija. Klasa funkcioniра tako da vrijednosni prostor (moguće vrijednosti piksela u slici) podijeli u diskretnе segmente, nakon čega analizira piksele i prebroji koliko ih pripada u pojedine segmente.



Slika 39 – Primjer histograma, [2]

3. Kombiniranje slika – dvije slike mogu se kombinirati korištenjem određenog logičnog operatera. Za to služi klasa `vtkImageLogic`, koja podržava sljedeće operatore: *AND*, *OR*, *XOR*, *NAND*, *NOR*, *NOT*.
4. Proizvoljni presjek volumena (engl. *image reslice*) – klasa `vtkImageReslice` izvršava ponovno uzorkovanje (engl. *resampling*) volumena koristeći proizvoljno definiranu os. Drugim riječima, iako su svi slajsovi u skupu podataka međusobno paralelni, ova klasa može generirati kosi presjek volumena. Ishodište, doseg i gustoća uzorkovanja mogu biti specificirani; osim toga klasa može izvršiti razne operacije na podacima, poput permutiranja, preslagivanja i rotiranja slikovnih podataka.

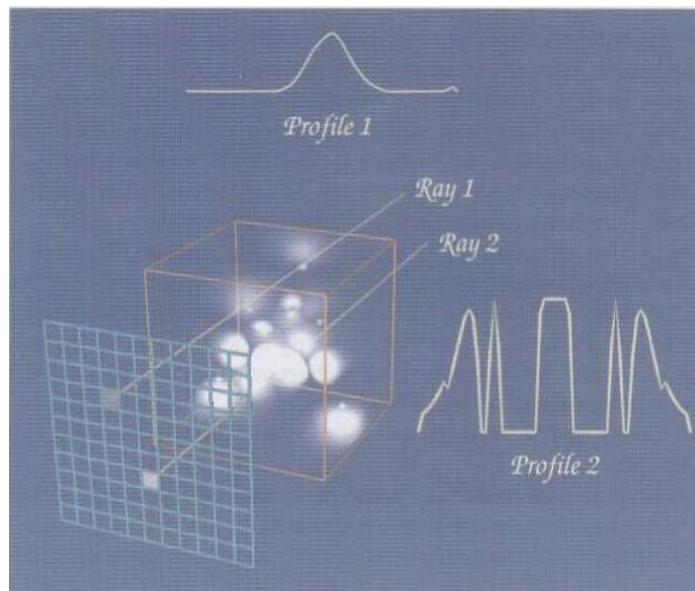
[2, str:132–136][37]

4.2. Metode 3D vizualizacije

Medicinska vizualizacija se bavi skupovima podataka koji su po svojoj prirodi trodimenzionalni (snimljeni volumeni pacijenta) te je korisno i praktično te podatke pregledati u 3D-u, umjesto samog proučavanja poprečnih presjeka. Sustav VTK je vrlo moćan u tom pogledu te nudi dobru funkcionalnost za volumno iscrtavanje medicinskih podataka.

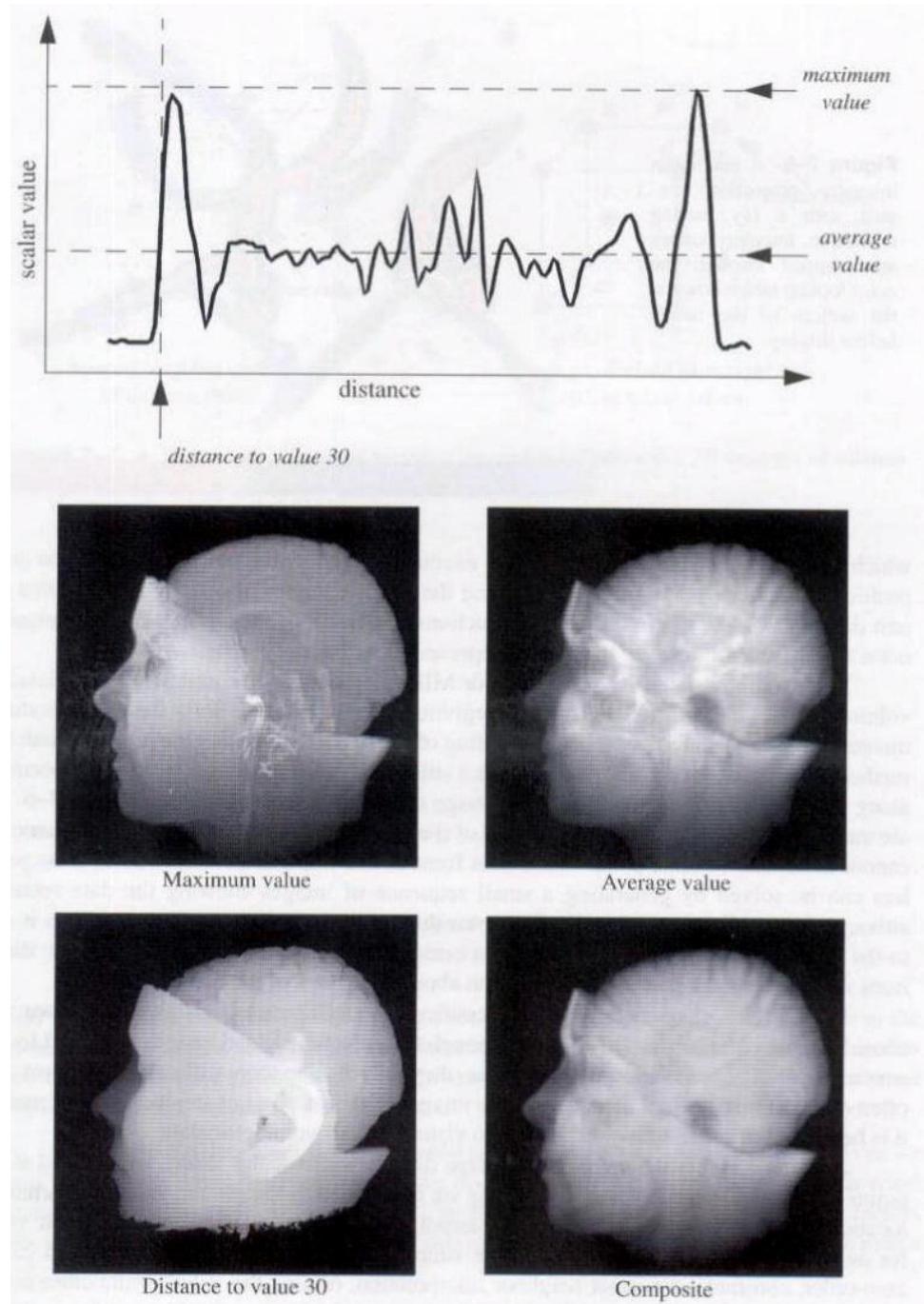
4.2.1. Volumno iscrtavanje

Osnovni način prikaza 3D volumena je metoda „bacanja zraka“ (engl. *ray casting* ili *ray tracing*, također poznato i pod nazivom *image-order volume rendering*). Glavna ideja ove metode je da se vrijednost svakog piksela u slici odredi korištenjem postupka „slanja“ zrake kroz taj piksel u scenu, koristeći određene parametre očišta (kamere). Postupak evaluira podatke u točkama kroz koje prolazi zraka i koristeći njih računa vrijednost piksela.



Slika 40 – Postupak bacanja zrake, [1]

U primjeru ilustriranom slikom 29 postavke očišta su namještene tako da se koristi ortografska projekcija, što znači da će se sve zrake kretati međusobno paralelno. Vrijednosti na koje zraka nailazi se obrađuju na temelju prijenosne (transfer) funkcije; u ovom slučaju funkcija određuje maksimalnu vrijednost na putu kojim je zraka prošla te tu vrijednost pretvara u piksel sive boje – minimalna vrijednost odgovara crnoj boji, maksimalna vrijednost se preslikava u bijelu boju.



Slika 41 – Podatkovni profil zrake i 4 primjera transfer funkcije, [1]

Na slici 30 prikazan je podatkovni profil zrake koja je prošla kroz određeni 8-bitni volumen (vrijednosti 0–255). Na x-osi označena je udaljenost od očišta, dok je na y-osi predstavljena vrijednost podataka. Ispod prikaza profila nalaze se rezultati dobiveni korištenjem četiri jednostavnih transfer funkcija:

- Maksimalna vrijednost – osnovna operacija na skalarnim vrijednostima podataka
- Prosječna vrijednost – također osnovna operacija
- Udaljenost vrijednosti 30 – ova funkcija računa udaljenost od očišta do točke na kojoj je zraka prvi puta naišla na vrijednost podatka veću ili jednaku 30
- Kompozitna funkcija – vrijednosti na koje je zraka naišla tretiraju se kao uzorci neprozirnosti akumulirani po jedinici udaljenosti

Projekcija maksimalne vrijednosti (engl. *maximum intensity projection* – MIP) jedna je od najjednostavnijih načina vizualizacije volumena. Dobro se nosi s šumom u podacima te proizvodi slike koje često daju intuitivni uvid u skup podataka.

[1, str:197–201]

4.2.2. Primjer iscrtavanja iso-površina

Sustav VTK podržava različite načine pretvorbe podataka u 3D prikaz. U ovom poglavlju demonstrirat će se metoda prikaza medicinskih podataka korištenjem tehnike ekstrahiranja površina. Cilj ovog primjera je uzeti skup podataka koji je dobiven CT skenom ljudske glave – podaci su podijeljeni u 93 poprečnih presjeka razmaknutih 1,5 mm. Svaki presjek ima 256×256 piksela, međusobno razmaknutih 0,8 mm i s 12 bitova dubine.

Potrebno je izvršiti 4 zadatka:

- Pročitati podatke
- Stvoriti iso-površinu (engl. *isosurface*) za svaki željeni anatomske objekt
- Transformirati modele iz pacijentovog prostora u globalni prostor
- Iscretati modele

Podaci se učitavaju iz datoteka bez zaglavlja (RAW format). Za potrebe učitavanja podatka iz takvog izvora koristi se klasa `vtkVolume16Reader`.

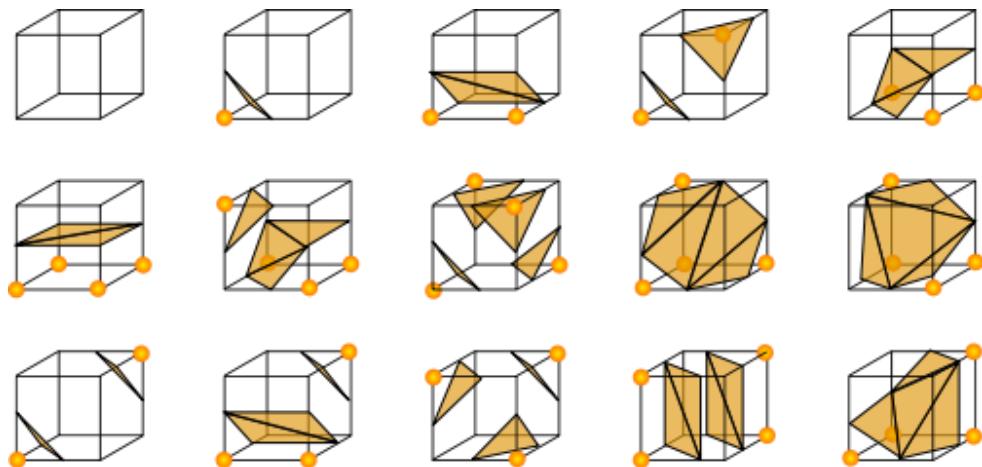
Iso-površine se mogu stvoriti korištenjem jedne od 3 tehniki:

- Volumno iscrtavanje

- *Marching cubes*
- *Dividing cubes*

Za većinu medicinskih primjena, algoritam *marching cubes* generira veliki broj trokuta (poligona). Zato ga se preporuča koristiti samo kod iscrtavanja na odgovarajućoj sklopovskoj opremi (engl. *hardware assisted rendering*); čak i tada, često je potrebno smanjiti rezoluciju skupa podataka, te će se to i ovdje učiniti: presjeci će se smanjiti od 256^2 na 64^2 veličinu presjeka.

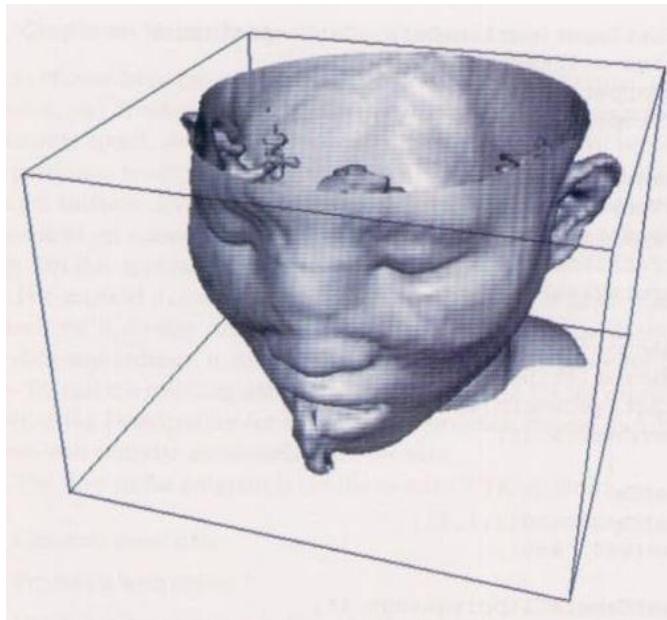
Marching cubes je grafički algoritam namijenjen ekstrahiranju poligonalne mreže iso-površina iz 3D polja skalara. To se postiže analizom skalarnog polja: algoritam uzima po 8 susjednih točaka odjednom (čime se formira kocka) te određuje odgovarajuću konfiguraciju poligona za reprezentaciju uzetog segmenta volumena. Određivanje poligona se izvršava na temelju prethodno izračunatog niza od 256 mogućih konfiguracija poligona.



Slika 42 – 15 jedinstvenih konfiguracija poligona, [38]

Na skup podataka primjenjuje se filter `vtkMarchingCubes`. Također se koristi klasa `vtkPolyDataNormals` koja će izračunati normale za dobivenu površinu. Izlaz iz generatora iso-površina (`vtkMarchingCubes`) se zatim proslijeđuje klasama `vtkPolyDataMapper` i `vtkActor`, koje će preslikati poligonalne podatke u obliku grafičkih primitiva.

Podaci su spremni za prikaz, no još uvijek se neke stvari mogu poboljšati prije iscrtavanja. Korištenjem metoda SetDiffuseColor i SetSpecular koji su ugrađeni u klasi vtkActor može se promijeniti boja modela te intenzitet odsjaja.



Slika 43 – Dobiveni prikaz ekstrahirane kože iz CT skena, [1]

[1, str:401–408][38]

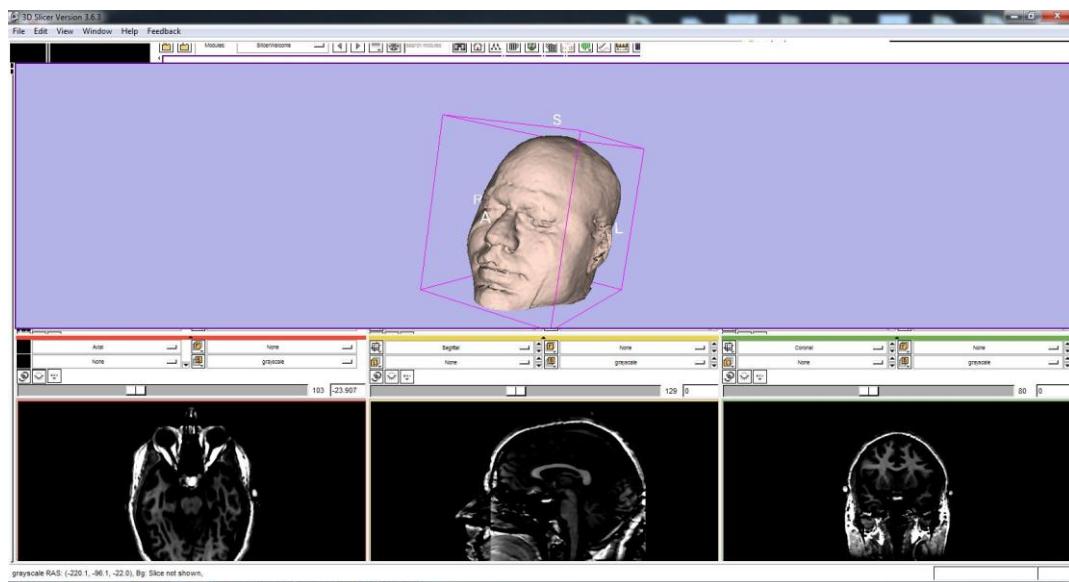
4.2.3.3D vizualizacija uz korištenje alata 3DSlicer

3DSlicer besplatni je program otvorenog kôda koji se koristi za analizu slika i znanstvenu vizualizaciju, s naglaskom na 3D iscrtavanje. Podržava brojne mogućnosti poput: interaktivne vizualizacije 3D slika sastavljenih od volumnih elemenata (voksela), automatsku segmentaciju slika i učitavanje iz datoteka u DICOM formatu.

Skup podataka korišten u ovom primjeru sastavljen je od MR snimke mozga zajedno s 3D rekonstrukcijom površina glavnim anatomske regija mozga (npr. koža, lubanja, itd.). Podaci su preuzeti iz baze podataka – „moždanog atlasa“ – koje pruža institut SPL (*Surgical Planning Laboratory*)².

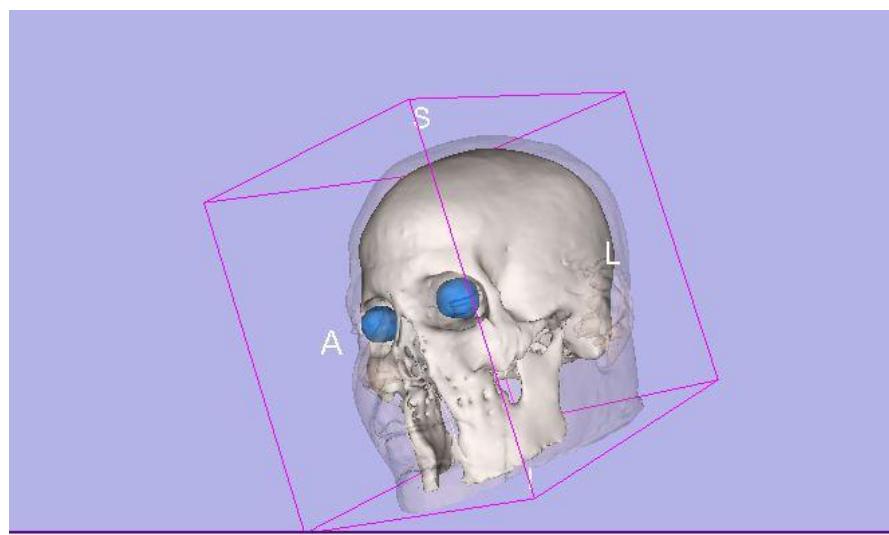
² <http://www.spl.harvard.edu/publications/item/view/1265>

Nakon učitavanja podataka 3DSlicer automatski prikazuje 3D sliku modela. U glavnom dijelu prozora vidljiv je prikaz volumena ljudske glave (kojim trenutno dominira koža i blokira vidljivost unutrašnjih dijelova). Također su vidljiva i tri poprečna presjeka (aksijalni, sagitalni i koronalni) koji prikazuju MRI snimke.



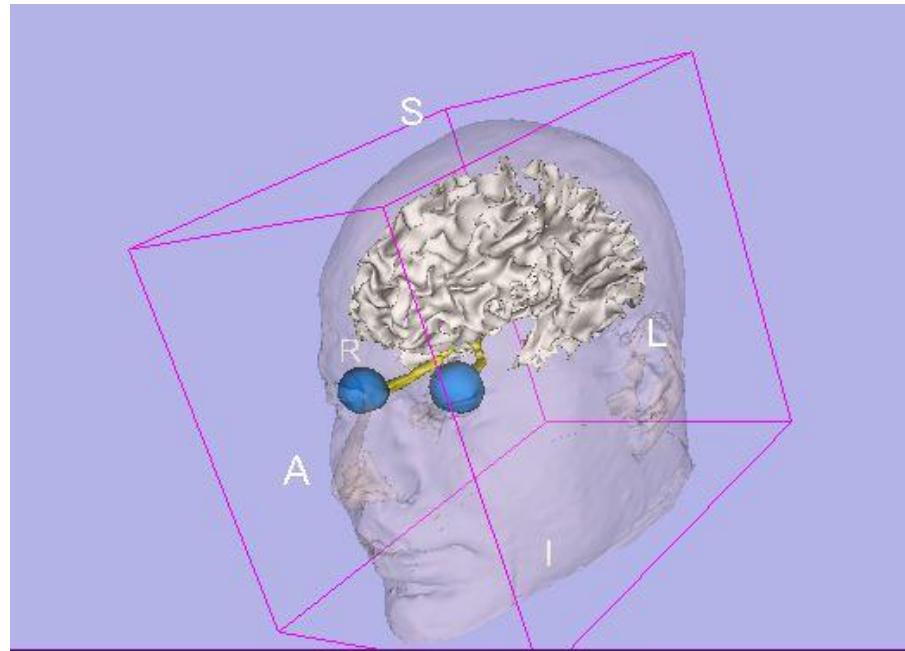
Slika 44 – Prikaz 3D modela ljudske glave dobiven u programu 3DSlicer

Budući da je za model glave već obrađena rekonstrukcija površina i separacija u diskretne, nezavisne dijelove, korisnik može jednostavno utjecati na prikaz – primjerice, smanjenjem neprozirnosti kože otvara se pogled u unutrašnjost lubanje.



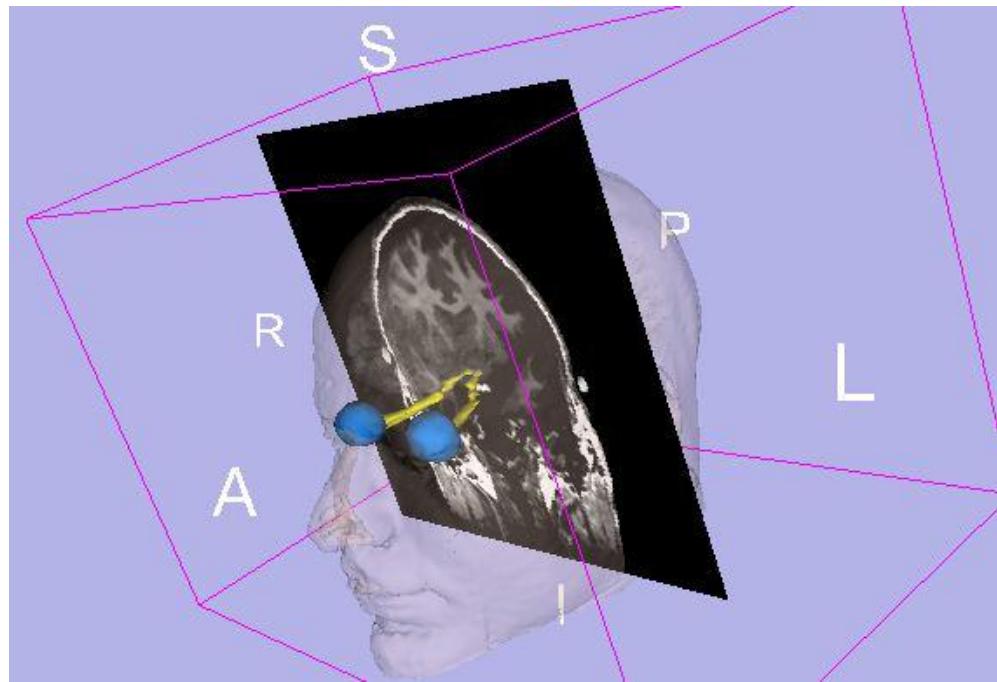
Slika 45 – Model ljudske glave sa smanjenom vidljivošću kože

Za daljnje prodiranje u unutrašnjost lubanje potrebno je isključiti vidljivost kostiju glave, što je prikazano na slici 46.



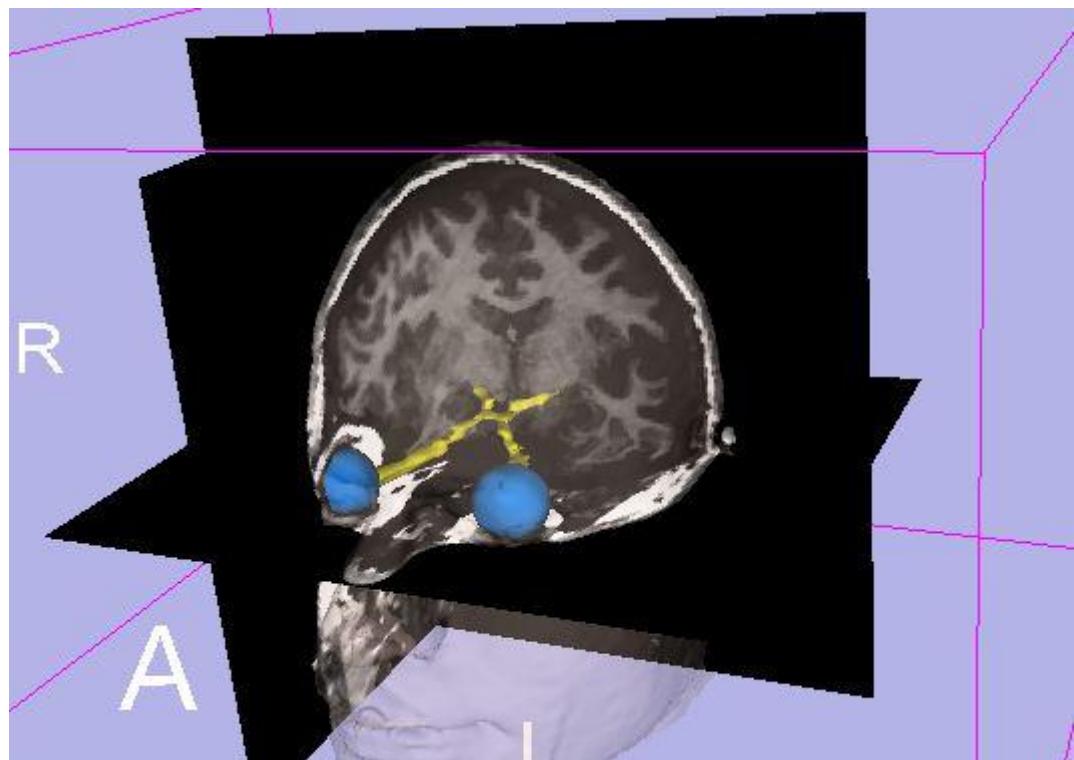
Slika 46 – Prikaz modela mozga u programu 3DSlicer

Izključivanjem vidljivosti modela mozga može se dobiti praktičan pogled u poprečne presjeke MR snimke. Na slici 47 prikazan je središnji koronalni poprečni presjek; korisnik može jednostavnom interakcijom promijeniti prikazani presjek.



Slika 47 – Prikaz koronalnog poprečnog presjeka MRI snimke unutar modela ljudske glave

Također je moguće istodobno prikazati tri poprečna presjeka, kao na slici 48.



Slika 48 – Prikaz sva tri poprečna presjeka MRI snimke

5. Zaključak

Medicinska vizualizacija je, uz ostale brojne napretke u medicinskim znanostima 20. i 21. stoljeća, donijela velika poboljšanja u zdravstvu i kvaliteti ljudskog života. Opasne se bolesti danas mogu mnogo lakše otkriti i bolje analizirati. Budući da se ranije dijagnosticiraju oboljenja pacijenti će prije započeti s liječenjem te će njihove šanse za oporavak biti mnogo bolje nego prije nekoliko desetljeća.

Moderne metode korištene u vizualizaciji na naprednim digitalnim računalima, od 2D prikaza do 3D iscrtavanja, uvelike olakšavaju rad medicinskim tehničarima, radiologima i istraživačima, te im omogućuju brojne moćne postupke koje su nekad bile nezamislive. Uvid u ljudsko tijelo stalno se povećava te znanost dolazi do boljih shvaćanja građe i funkciranja raznih sustava organa; medicinska vizualizacija je to omogućila bez invazivnih postupaka (operativnih zahvata, obdukcija, itd.).

Budućnost vizualizacije podataka je obećavajuća; pogonjeni eksplozivnim razvojem hardverskih moći računala konstantno se razvijaju sve snažniji i efikasniji algoritmi koji barataju iznimno kompleksnim i masivnim skupovima podataka. Može se reći da je vizualizacija uspjela povećati ljudsku inteligenciju. Cilj znanstvene discipline umjetne inteligencije oduvijek je bio stvoriti računalni sustav koji bi bio sposoban zamijeniti čovjeka u raznim kognitivnim poslovima. Iako se to do danas još nije ostvarilo u velikoj mjeri, druga računalna područja poput medicinske vizualizacije razvila su postupke i aplikacije koje pomažu ljudima u obavljanju određenih zadataka na što brži i učinkovitiji način. Kombiniranje čovjeka i računala kao posljedicu ima efektivno povećanje ljudske inteligencije u obliku dubljeg uvida u prirodu raznih skupova informacija, koje će se u narednim godinama sve brže razvijati.

6. Sažetak

Medinska vizualizacija znanstvena je disciplina koja se bavi prikupljanjem, analizom i prikazom skupova podataka koji opisuju ljudsko tijelo. Ona je dio biološke vizualizacije te spada u kategoriju znanstvenih vizualizacija.

U području dijagnostičke medicine vizualizacija se upotrebljavala i prije pojave računala. Otkriće rendgenskih zraka krajem 19. st. je potaklo razvoj radiologije, grane medicine koja se bavi izradom slikovnih reprezentacija dijelova ljudskog tijela koristeći razne tehnologije, u cilju diagnosticiranja i liječenja bolesti. U 20. st. doktori i radiolozi dobivali su sve bolje slike potaknute brojnim izumima poput uporabe gradijenata, ultrazvuka, nuklearne medicine, itd. U novije doba uporaba računala je uzrokovala razvoj digitalnih metoda poput CT-a i MRI-ja.

Magnetska rezonanca (MRI) ne koristi rendgenske zrake, što je velika prednost jer pacijenti ne bivaju izloženi opasnim dozama ionizirajućeg zračenja. MRI se bazira na uporabi snažnih magneta i radio valova za dobivanje slike unutrašnjosti ljudskog tijela.

Podaci dobiveni digitalnim tehnologijama spremaju se u raznim formatima, od kojih je najrašireniji DICOM. To je vrlo opsežni standard koji formalno definira većinu procedura u radu s digitalnim medicinskim podacima: rukovanje, skladištenje, ispis i prijenos podataka.

Spremljeni skupovi podataka vizualiziraju se korištenjem raznih metoda računalne grafike i znanstvene vizualizacije. Najčešći prikaz je u 2D, no u novije doba sve više se koriste i 3D metode. Postoji velik broj sustava programske potpore namijenjenih korištenju u medicinskoj vizualizaciji. Jedan od najpopularnijih je sustav VTK, koji se sastoji od biblioteke klase pisanih u jeziku C++ namijenjenih radu u 2D i 3D računalnoj grafici, obradi i analizi slika te vizualizaciji. Korištenjem VTK-a razvijeni su i medicinski sustavi više razine, koji omogućavaju praktično vizualno sučelje ili grafičko programiranje modula za ostvarivanje naprednih zadataka medicinske vizualizacije. Primjeri takvih programa su MeVisLab i 3DSlicer.

7. Popis slika i tablica

7.1. Popis slika

| | |
|--|----|
| Slika 1 – Primjer vizualizacije mozga iz MRI izvora, [3]..... | 3 |
| Slika 2 – Izlaganje zračenju američke populacije, [5] | 4 |
| Slika 3 – Originalna karta Dr. Johna Snowa koja pokazuje nakupine slučajeva kolere, [6]..... | 7 |
| Slika 4 – Minardova vizualna reprezentacija Napoleonovog vojnog pohoda u Rusiji, [7]..... | 8 |
| Slika 5 – Minardova karta Francuske na kojoj je grafički prikazana količina stoke poslana u Pariz, [7]..... | 9 |
| Slika 6 – Djelomična mapa Interneta iz 2006., [8] | 10 |
| Slika 7 – Primjer znanstvene vizualizacije: prikaz meteoroloških prilika, [9].... | 11 |
| Slika 8 – Maxwellova termodinamička površina iz 1874., [10] | 12 |
| Slika 9 – Prva medicinska rendgenska slika; snimljena 1895., predstavlja šaku žene Wilhelma Röntgena, [13] | 13 |
| Slika 10 – Rendgenski način snimanja s fluorescentnim ekranom, [14]..... | 14 |
| Slika 11 – Kompletni sken kostiju tijela dobiven nuklearnom medicinom, [15] . | 15 |
| Slika 12 – Ultrazvuk fetusa, [16]..... | 16 |
| Slika 13 – Tipični CT sken ljudske glave, [17] | 16 |
| Slika 14 – Prikaz lepezastog snopa rendgenskih zraka kod CT skeniranja | 17 |
| Slika 15 – Dobivanje jedne rendgenske trenutačne snimke, [21] | 18 |
| Slika 16 – Prikaz snimanja iz različitih kutova, [22] | 18 |
| Slika 17 – Shema modernog CT sustava, [20] | 19 |
| Slika 18 – Usporedba MRI snimke bez (lijevo) i s korištenjem gradijenta (desno), [23] | 20 |
| Slika 19 – Koraci u radu MRI stroja, [24] | 21 |

| | |
|--|----|
| Slika 20 - Precesija spina jezgre u magnetskom polju, [26] | 22 |
| Slika 21 – Shema MRI stroja, [25]..... | 24 |
| Slika 22 – MRI snimka mozga koristeći tehniku FLAIR, [26] | 25 |
| • Slika 23 – Traktografska rekonstrukcija neuralnih veza dobivena DTI načinom snimanja, [27] | 26 |
| Slika 24 – Snimak mozga fMRI tehnikom, [26]..... | 27 |
| Slika 25 – Primjer MR angiografije, [28] | 27 |
| Slika 26 – Snimka proširenih žučnih vodova, dobivena MRCP tehnikom, [26] | 28 |
| Slika 27 – Dijagram usluga pokrivenih standardom DICOM, [33]..... | 31 |
| Slika 28 – Vrste ćelija u sustavu VTK, [1]..... | 38 |
| Slika 29 – Tipovi skupova podataka, [1]..... | 40 |
| Slika 30 – Razina transferske funkcije, [2] | 41 |
| Slika 31 – 2D vizualizacija MRI snimke glave, aksijalni poprečni presjek | 43 |
| Slika 32 – Vizualizacija višestrukih MRI (koronalnih) poprečnih presjeka ljudske glave..... | 43 |
| Slika 33 – Vizualizacija s pojačanim kontrastom i smanjenom svjetlinom..... | 44 |
| Slika 34 – Vizualizacija dobivena uporabom modula View2D | 45 |
| Slika 35 – Tri vrste poprečnih presjeka, [39] | 46 |
| Slika 36 – Primjer mreže modula u sustavu MeVisLab | 47 |
| Slika 37 - Vizualizacija dobivena uporabom modula OrthoView2D | 47 |
| Slika 38 – Primjeri gradijenta u slikama, [37]..... | 48 |
| Slika 39 – Primjer histograma, [2] | 49 |
| Slika 40 – Postupak bacanja zrake, [1] | 50 |
| Slika 41 – Podatkovni profil zrake i 4 primjera transfer funkcije, [1] | 51 |
| Slika 42 – 15 jedinstvenih konfiguracija poligona, [38]..... | 53 |
| Slika 43 – Dobiveni prikaz ekstrahirane kože iz CT skena, [1] | 54 |
| Slika 44 – Prikaz 3D modela ljudske glave dobiven u programu 3DSlicer | 55 |
| | 61 |

| | |
|---|----|
| Slika 45 – Model ljudske glave sa smanjenom vidljivošću kože | 55 |
| Slika 46 – Prikaz modela mozga u programu 3DSlicer | 56 |
| Slika 47 – Prikaz koronalnog poprečnog presjeka MRI snimke unutar modela ljudske glave..... | 57 |
| Slika 48 – Prikaz sva tri poprečna presjeka MRI snimke..... | 57 |

7.2. Popis tablica

| | |
|---|----|
| Tablica 1 – Dijelovi standarda DICOM, [30] | 29 |
| Tablica 2 – Modaliteti standarda DICOM, [30]..... | 32 |

8. Literatura

1. Schroeder, W; Martin, K; Lorensen, B: "The Visualization Toolkit", Kitware, Inc., New York, 2004.
2. Schroeder, W; et al: "The VTK User's Guide", Kitware, Inc., 2004.
3. Wikipedia contributors, "Medical imaging," Wikipedia, The Free Encyclopedia,
http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Medical_imaging&oldid=432397041
(pristupljeno 9. lipnja 2011.)
4. Roobottom CA, Mitchell G, Morgan-Hughes G: „Radiation-reduction strategies in cardiac computed tomographic angiography“, Elsevier Ltd., Amsterdam, 2010.
5. National Council on Radiation Protection & Measurements, "Medical Radiation Exposure Of The U.S. Population Greatly Increased Since The Early 1980s, <http://www.sciencedaily.com/releases/2009/03/090303125809.htm> (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
6. Wikipedia contributors, "John Snow (physician)," Wikipedia, The Free Encyclopedia,
[http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=John_Snow_\(physician\)&oldid=432441903](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=John_Snow_(physician)&oldid=432441903) (pristupljeno 9. lipnja 2011.).
7. Wikipedia contributors, "Charles Joseph Minard," Wikipedia, The Free Encyclopedia,
http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Charles_Joseph_Minard&oldid=417284425 (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
8. Wikipedia contributors, "Information visualization," Wikipedia, The Free Encyclopedia,
http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Information_visualization&oldid=430899499 (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
9. Wikipedia contributors, "Scientific visualization," Wikipedia, The Free Encyclopedia,

- http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Scientific_visualization&oldid=425019302 (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
10. Kriz, RD: "Thermodynamic Case Study: Gibbs' Thermodynamic Graphical Method", <http://www.sv.vt.edu/classes/ESM4714/methods/Gibbs.html> (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
11. Wikipedia contributors, "Visualization (computer graphics)," Wikipedia, The Free Encyclopedia,
[http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Visualization_\(computer_graphics\)&oldid=431148714](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Visualization_(computer_graphics)&oldid=431148714) (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
12. Imaginis, „History of Medical Diagnosis and Diagnostic Imaging“,
<http://www.imaginis.com/faq/history-of-medical-diagnosis-and-diagnostic-imaging> (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
13. Wikipedia contributors, "X-ray," Wikipedia, The Free Encyclopedia,
<http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=X-ray&oldid=432697366> (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
14. Umland, H: „High Voltage and X-Ray Experiments“,
<http://www.celnav.de/hv/hv7.htm> 432697366 (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
15. Wikipedia contributors, "Nuclear medicine," Wikipedia, The Free Encyclopedia,
http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nuclear_medicine&oldid=432563570 (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
16. Virtual Medical Centre, „Ultrasound Machine Picture Ultrasonography“,
[http://www.virtualmedicalcentre.com/healthinvestigations.asp?sid=8&title=Ultrasound-\(Ultrasound-Scanning-or-Sonography-and-Doppler\)](http://www.virtualmedicalcentre.com/healthinvestigations.asp?sid=8&title=Ultrasound-(Ultrasound-Scanning-or-Sonography-and-Doppler)) (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
17. RadLink, A computed tomography scan,
http://radlink.com.sg/patient_ct_scan.aspx (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
18. FDA, Computed Tomography (CT), <http://www.fda.gov/radiation-emittingproducts/radiationemittingproductsandprocedures/medicalimaging/medicalx-rays/ucm115317> (pristupljeno 9. lipnja 2011.)

19. Wikipedija - suradnici, "Računalna tomografija," Wikipedija, Slobodna enciklopedija,
http://hr.wikipedia.org/w/index.php?title=Ra%C4%8Dunalna_tomografija&oldid=2803203 (pristupljeno lipnja 9, 2011)
20. NDT Resource Center, Computed Tomography, <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/AdvancedTechniques/computedtomography.htm> (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
21. X-View CT, How Computed Tomography works,
<http://www.xviewct.com/computed-tomography-technology/how-ct-works>
(pristupljeno 9. lipnja 2011.)
22. Arnesen A, CUDA CT Backprojection Reconstruction,
http://wiki.arnesenfamily.net/doku.php?id=byu:projects:cuda_ct (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
23. Wikipedia contributors, "MRI contrast agent," Wikipedia, The Free Encyclopedia,
http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=MRI_contrast_agent&oldid=429856181 (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
24. Bayer Schering Pharma, Magnetic Resonance Imaging,
http://www.diagnostic-imaging.bayerscheringpharma.de/scripts/pages/en/public/modalities/magnetic_resonance_imaging_mri/index.php (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
25. Coyne K, MRI: A Guided Tour,
<http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/magnetacademy/mri/fullarticle.html> (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
26. Wikipedija - suradnici, "Magnetna rezonancija," Wikipedija, Slobodna enciklopedija,
http://hr.wikipedia.org/w/index.php?title=Magnetna_rezonancija&oldid=2931499 (pristupljeno lipnja 9, 2011)
27. Wikipedia contributors, "Diffusion MRI," Wikipedia, The Free Encyclopedia,
http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Diffusion_MRI&oldid=432194571
(pristupljeno 9. lipnja 2011.)

28. Wikipedia contributors, "Magnetic resonance imaging," Wikipedia, The Free Encyclopedia,
http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Magnetic_resonance_imaging&oldid=433149321 (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
29. Wikipedia contributors, "DICOM," Wikipedia, The Free Encyclopedia,
<http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=DICOM&oldid=432214412> (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
30. NEMA: „Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) - Part 1: Introduction and Overview“, NEMA, Rosslyn, USA, 2009.
31. Matković K: „Virtualna okruženja – Vizualizacija – SciVis“, Zavod za telekomunikacije, Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb, 2010.
32. RSNA Informatics, „The Value and Importance of an Imaging Standard“,
<http://www.rsna.org/Technology/DICOM/index.cfm> (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
33. FlatPanel DR, „What is DICOM and why is it important?“,
<http://www.flatpaneldr.com/?p=250> (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
34. Wikipedia contributors, "Analyze (imaging software)," Wikipedia, The Free Encyclopedia,
[http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Analyze_\(imaging_software\)&oldid=417791393](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Analyze_(imaging_software)&oldid=417791393) (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
35. Mayo Clinic, „ANALYZE TM 7.5 File Format“, Mayo Clinic, Rochester, USA, 2007.
36. Crabb, A, „File Formats“, <http://www.idoimaging.com/formats> (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
37. Wikipedia contributors, "Image gradient," Wikipedia, The Free Encyclopedia,
http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Image_gradient&oldid=421160257 (pristupljeno 9. lipnja 2011.)
38. Wikipedia contributors, "Marching cubes," Wikipedia, The Free Encyclopedia,
http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Marching_cubes&oldid=426579284 (pristupljeno 9. lipnja 2011.)

39. Wikipedia contributors, "Sagittal plane," Wikipedia, The Free Encyclopedia,
http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sagittal_plane&oldid=405613710
(pristupljeno 9. lipnja 2011.)

