

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Jure Kolenko

**Orodje za ročno poravnavo 2D in 3D  
medicinskih posnetkov**

DIPLOMSKO DELO  
UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE  
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

MENTOR: doc. dr. Matija Marolt

Ljubljana 2015



To delo je izdano pod licenco *Creative Commons Priznanje avtorstva - Nekomercialno - Deljenje pod enakimi pogoji 2.5 Slovenija* (ali novejšo). To pomeni, da se besedilo, slike, grafi in rezultati dela lahko prosto distribuirajo, reproducirajo, uporabljajo, priobčujejo javnosti in predelujejo pod pogojem, da se jasno in vidno navede avtorja in naslov tega dela in da se v primeru spremembe, preoblikovanja ali uporabe tega dela v svojem delu distribuira predelava le za nekomercialne namene in le pod licenco, ki je enaka tej. Podrobnosti licence so dostopne na spletni strani <http://creativecommons.si/>.

*Besedilo je oblikovano z urejevalnikom besedil L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.*



Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Orodje za ročno poravnavo 2D in 3D medicinskih posnetkov

A tool for manual alignment of 2D and 3D medical images

Tematika naloge:

V diplomskem delu implementirajte orodje za ročno poravnavo 2D in 3D medicinskih posnetkov. Preučite področje medicinske vizualizacije in izdelajte orodje, ki bo omogočalo poravnavo 2D rentgenskega posnetka s 3D mrežnim modelom. Izris naj temelji na senčilnikih, postopek pa vgradite tudi v aplikacijo za prikaz volumetričnih medicinskih podatkov NeckVeins.



## IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Spodaj podpisani Jure Kolenko sem avtor diplomskega dela z naslovom:

*Orodje za ročno poravnavo 2D in 3D medicinskih posnetkov*

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom doc. dr. Matije Marolta,
- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela,
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela na svetovnem spletu preko univerzitetnega spletnega arhiva.

V Ljubljani, dne 14. avgusta 2015

Podpis avtorja:





*Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Matiji Maroltu in še posebej as. mag. Cirilu Bohaku za pomoč pri pisanju in implementaciji diplomskega dela.*

*Zahvaljujem se tudi Aleksandru Bobiću za moralno podporo in pomoč pri izdelavi, Gregorju Časarju za dovoljenje uporabe njegove kode pri delu samostojne aplikacije ter Gašperju Medvedu za splošne nasvete pri programiranju.*

*Posebna zahvala gre tudi moji družini za vzpodbudo in podporo med študijem.*



Svojim staršem.



# Kazalo

Povzetek

Abstract

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Metode in orodja</b>	<b>3</b>
2.1	Java in Eclipse . . . . .	3
2.2	Nabor podatkov . . . . .	4
2.3	Aplikacija za vizualizacijo . . . . .	5
2.4	Strojno pospešen izris 3D grafike . . . . .	6
2.5	Projekcija tekstone na 3D model . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Implementacija</b>	<b>15</b>
3.1	Programska ovojnica za LWJGL . . . . .	15
3.2	Samostojna aplikacija . . . . .	22
3.3	Integracija v aplikacijo za vizualizacijo . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Zaključek</b>	<b>29</b>



# Seznam uporabljenih kratic

kratica	angleško	slovensko
<b>NDC</b>	normalized device coordinates	normalizirane koordinate naprave
<b>3D</b>	three dimensional	tri dimensionalno
<b>2D</b>	two dimensional	dvo dimensionalno
<b>JVM</b>	Java virtual machine	javanski navidezni stroj
<b>LWJGL</b>	Light weight Java game library	lahka javanska knjižnica za igre
<b>GLSL</b>	OpenGL shading language	OpenGL jezik za senčilnike
<b>CT</b>	computer tomography	računalniška tomografija
<b>MRI</b>	magnetic resonance imaging	slikanje z magnetno resonanco





# Povzetek

Napisal sem razširitev za aplikacijo, ki prikazuje model ožilja v prostoru. Razširitev uporabniku omogoča poravnavo 2D rentgenskega posnetka s 3D mrežnim modelom. Model se pri poravnavi premika neodvisno od projekcije, ko pa je uporabnik zadovoljen, pa lahko projekcijo in model zaklene, tako da se premikata skupaj. Premikanje in rotiranje je možno z miško ali s tipkovnico. Za hitrejši izris sem uporabil aplikacijski programski vmesnik za strojno pospešen izris OpenGL in njegovo funkcionalnost senčilnikov. Za lažje programiranje sem napisal programsko ovojnico, ki nizkonivojske koncepte OpenGL predstavi bolj razumljivo.

**Ključne besede:** OpenGL, GLSL, projekcija, poravnava, senčilniki.



# Abstract

I wrote an extension for an application that displays a model of a vascular system of a patient. The extension allows the user to align a 2D x-ray image with a 3D mesh. The model moves independently from the projection, but when the user is satisfied with the alignment, they can lock the projection and the model together, so they move in unison. Moving and rotating the model is possible with the mouse and keyboard. For faster rendering I utilized the OpenGL application programming interface and its shader functionality. For easier development I first wrote a wrapper for OpenGL, which presents low level OpenGL concepts more understandably.

**Keywords:** OpenGL, GLSL, projection, alignment, shaders.



# Poglavje 1

## Uvod

Računalniki so že dolgo pomembni za ljudi, v zadnjem času pa še toliko bolj, saj so vedno zmogljivejši, močnejši in cenejši. Z razvojem računalnikov se je razvila tudi tehnologija za vizualizacijo, ki močno izboljša predstavo informacij v primerjavi z golimi številkami.

V medicini imamo množico slikovnih podatkov, ki pa jih je težko vizualizirati na zaslonu oziroma papirju, ker so objekti interesa tri dimenzionalni (3D), papir pa dvo dimenzionalen (2D). Tu pride v poštev vizualizacija, tako da posnetke vidimo na zaslonu tako, kot dejansko izgledajo v realnosti.

Volumetrične podatke se lahko pridobi z računalniško tomografijo (angl. computer tomography - CT), slikanjem z magnetno resonanco (angl. magnetic resonance imaging - MRI), angiografijo in drugimi metodami. Te metode proizvedejo množico 2D slik, ki se nato sestavijo v tridimenzionalno podobo, iz katere pa v osnovi ni veliko razvidno, zato jo je potrebno obdelati. Primer obdelave je poligonizacija, ki iz volumetričnih podatkov izlušči mrežni model.

Med nekaterimi operacijami si zdravniki pomagajo z rentgensko sliko v realnem času, vendar pa vidljivost ni najboljša, ker si s tako sliko težko predstavljamo globino.

Cilj moje diplomske naloge je bil narediti orodje za poravnavo 2D in 3D medicinskih podatkov, ki bi zdravnikom pomagal razbrati kje v prostoru se nahajajo deli 2D posnetka. Uporabnik naj bi izbral mrežni model ožilja in

pripadajoč rentgenski posnetek, nato pa z rotiranjem in premikanjem modela oziroma slike poskrbel, da se ujemata. V naslednjem poglavju bom opisal orodja, ki sem jih uporabil, ter kako deluje sama projekcija 2D teksture na 3D model, nato pa bom opisal še kako sem nalogo implementiral kot samostojno aplikacijo, ter jo nato integriral v že obstoječo aplikacijo.

## Poglavje 2

# Metode in orodja

### 2.1 Java in Eclipse

Za razvoj programskega dela diplomske naloge sem uporabil programski jezik Java [3] in razvojno okolje Eclipse [2], saj sem se z obema že seznanil pri prejšnjih projektih na fakulteti, tako da je bil razvoj veliko lažji.

#### Java

Java je objektno orientiran programski jezik, ki ga je razvilo podjetje Sun Microsystems leta 1995. Osnovan je na jezikoma C in C++, vendar pa je počasnejši. Prevede se v nižjenivojsko bajtno kodo, ki pa jo nato tolmači javanski navidezni stroj (angl. Java virtual machine - JVM). Ta vmesna stopnja med procesorjem in bajtno kodo omogoča princip *'napiši enkrat, izvajaj kjerkoli'*, kar je bil eden izmed glavnih ciljev razvoja tega programskega jezika. Pred uporabnikom skrije nekatere programske konstrukte, kot so kazalci in upravljanje s pomnilnikom, kar pomeni da je višjenivojski jezik.

Java je trenutno eden najpopularnejših jezikov [12], h čemur verjetno pripomore lahek razvoj in vseprisotnost tehnologij, ki jo uporabljajo, kot na primer operacijski sistem Android in mnoge strežniške arhitekture. Poleg računalnikov je Java namenjena še vgrajenim sistemom z Java Micro Edition ter razvoju aplikacij za podjetja z Java Enterprise Edition.

## Eclipse

Eclipse je odprtokodno integrirano razvojno okolje. V osnovi je namenjeno programiranju Java aplikacij, vendar pa obstajajo vtičniki tudi za mnoge druge jezike, kot na primer JavaScript, C, C++ in druge. Z vtičniki je mogoče dodati tudi drugačno funkcionalnost in sicer stvari kot dodatek ObjectAid UML Explorer [7], ki je bil uporabljen za izris diagrama dedovanja v sliki 3.1.

Prednost uporabe Eclipse je urejevalnik, ki omogoča samodejno dopolnjevanje izrazov in opozarja na napake, ter razhroščevalnik in prikaz ustrezne dokumentacije.

## 2.2 Nabor podatkov

3D posnetki so volumetrični posnetki ožilja možganov, narejeni z računalniško tomografijo, ki so nato s pomočjo funkcionalnosti že obstoječe aplikacije pretvorjeni v mrežni model, 2D posnetki pa so rentgenski posnetki ožilja. Model ožilja je shranjen kot mrežni model ali kot volumetrični podatki, rentgenski posnetki pa so shranjeni v datotekah tipa Jpeg[4].

Mrežni model je sestavljen iz trikotnikov, ki jih nato izriše grafična procesna enota. Za hranjenje mrežnega modela je uporabljena spremenjena različica standarda Obj datotek [6], ki ga je razvilo podjetje Wavefront technologies. Standard je odprt in ima široko podporo med orodji za vizualizacijo 3D mrežnih modelov. Standard je tekstoven, tako da so datoteke zlahka berljive, slabost tega pa je večja velikost datotek.

```
1 #Komentarji so vrstice , ki se začnejo z znakom '#'
2 #Vrstice , ki se začnejo z 'v' predstavljajo oglišča
3 v -1 -1 0
4 v 1 -1 0
5 v -1 1 0
6 v 1 1 0
7 #Vrstice , ki se začnejo z 'vt' predstavljajo teksturne koordinate
8 vt 0 0 0
9 vt 1 0 0
```



```
10 vt 0 1 0
11 vt 1 1 0
12 #Vrstice , ki se začnejo z 'vn' predstavljajo normale
13 vn 0 0 1
14 vn 0 0 1
15 vn 0 0 1
16 vn 0 0 1
17 #Vrstice , ki se začnejo s 'f' predstavljajo ploskve
18 f 1/1/1 2/2/2 4/4/4
19 f 1/1/1 4/4/4 3/3/3
```

Datoteka 2.1: Primer Obj datoteke, ki predstavlja kvadrat.

Različica podpira samo del standarda, in sicer zapis za položaje oglišč ter definicijo ploskev, ne podpira pa naprimer teksturnih koordinat in normal, saj se v programu ne uporabljajo oziroma se izračunajo.

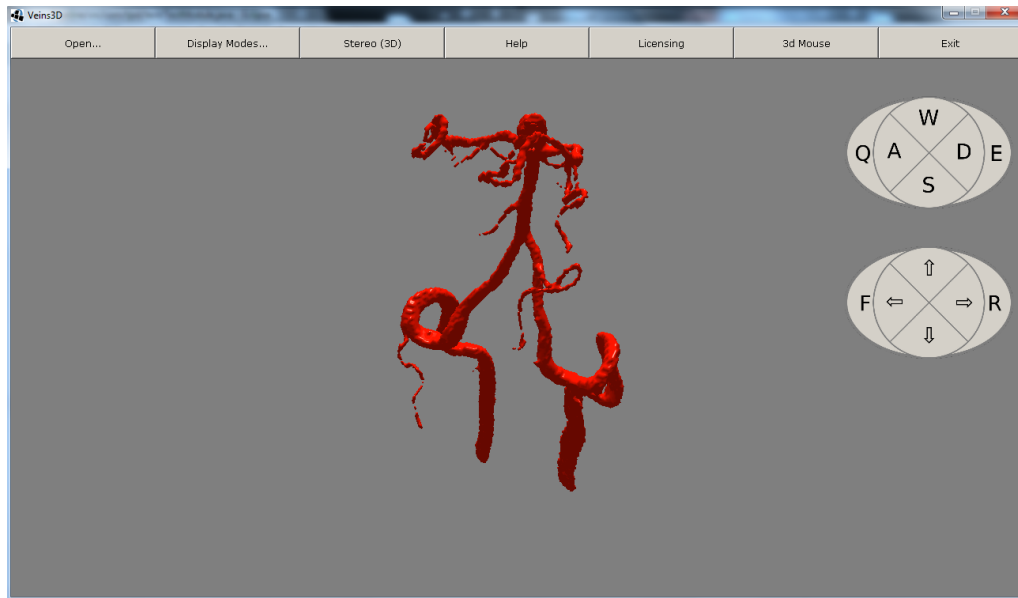
Volumetrični podatki so shranjeni v datotekah tipa Mhd[5] in v njim pripadajočih datotekah z binarnimi podatki. Datoteka Mhd je opisna datoteka, ki definira kakšni podatki so shranjeni v binarnih datotekah. Za volumetrične podatke pove naprimer število dimenzij in velikost vsake dimenzije, razdaljo med sosednjimi elementi, začetni položaj, ime pripadajoče binarne datoteke in druge podatke.

Rentgenske slike so v datotekah tipa Jpeg, ki so namenjene shranjevanju slikovnih podatkov v stisnjeni obliki.

## 2.3 Aplikacija za vizualizacijo

Aplikacija NeckVeins je namenjena prikazovanju žil tilnika pacienta. Razvila sta jo Anže Sodja [14] in Simon Žagar [13]. Model in pogled se da poljubno premikati in obračati. Modeli žil so prebrani iz datotek tipa Obj ali Mhd. Podatki iz Mhd datotek se najprej pretvorijo v mrežni model z uporabo algoritma marching cubes. Model se, ko se naloži, centrira in prikaže na zaslonu. Prikaz je možno spreminjati od čisto osnovnega izrisa do izrisa z odbleskom in do izrisa le mreže modela. Slika 2.1 prikazuje glavni pogled

aplikacije.



Slika 2.1: Glavni prikaz aplikacije za vizualizacijo.

## 2.4 Strojno pospešen izris 3D grafike

Za strojno pospešen izris 3D grafike obstaja več aplikacijskih programerskih vmesnikov. Najbolj znana in razširjena sta DirectX [1] in OpenGL [8]. DirectX je razvil Microsoft leta 1995 in je namenjen razvoju aplikacij na operacijskem sistemu Windows. OpenGL je leta 1992 razvil Silicon Graphics Inc., sedaj pa ga nadzira neprofitna skupnost Khronos Group. Namenjen je strojno pospešenemu izrisu na večih platformah in v večih jezikih.

V diplomski nalogi sem uporabil odprtokodno knjižnico LWJGL (angl. lightweight Java game library), ki omogoča uporabo vmesnika OpenGL.

OpenGL doda višjenivojsko abstrakcijo grafične procesne enote. Obstaja več različnih tipov grafičnih procesnih enot z različnimi zmogljivostmi, ki pa jih zaradi abstrakcije lahko programiramo z enotnim programskim vmesnikom.

## 2.5 Projekcija teksture na 3D model

Projekcija teksture na objekt deluje v treh korakih. Najprej je potrebno izrisati globinsko sliko iz pogleda projektorja oziroma luči, nato ugotoviti kaj na modelu dejansko zadanejo žarki projektorja, potem pa še pravilno pobarvati dele, ki jih žarki zadanejo.

### Premik točke v prostoru

3D točka se v računalniški grafiki zapiše kot vektor dolžine 4. Zadnja koordinata je potrebna za predstavitev v homogenem sistemu, ki omogoča premik z matričnim množenjem namesto seštevanjem. Rotacije okrog osi x, y in z so dosežene z matričnim množenjem z matrikami 2.1, 2.2 in 2.3.

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Skaliranje se doseže z matriko 2.4,

$$S = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

premik pa z matriko 2.5.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

S pomočjo teh treh matrik lahko objekte poljubno premikamo v prostoru. Ti premiki objekte preslikajo iz lokalnih koordinat v globalne koordinate. Lokalni koordinatni sistem je sistem, v katerem je bil objekt ustvarjen, globalni sistem pa ima dejanske položaje objektov.

## Kamera

Kamera preslika objekte iz njihovega 3D položaja v svetu na 2D položaj na zaslonu. Za preslikavo najprej iz svetovnih koordinat preslikamo v koordinatni sistem kamere, potem v normalizirane koordinate naprave (angl. normalized device coordinates - NDC), nato pa še v koordinatni sistem zaslona. Preslikava v koordinatni sistem kamere premakne svetovni sistem tako, da je kamera v središču in gleda proti pozitivni z osi. NDC je koordinatni sistem, v katerem je vse kar se bo izrisalo na koordinatah, ki jih določa kvader z oglišči v  $[1, 1, 1]$  in  $[-1, -1, -1]$ . Koordinatni sistem zaslona so dejanski položaji pikslov na zaslonu, tako da je potrebno položaje preslikati na kvadrat z oglišči v  $[0, 0]$  in  $[\text{širina}, \text{višina}]$ . Za preslikavo v NDC poskrbi projekcijska matrika kamere, za preslikavo v koordinatni sistem zaslona pa potrebujemo le širino in višino zaslona.

Poznamo dve osnovni vrsti preslikav v NDC, vzporedne in perspektivne. Pri vzporednih preslikavah so projekcijski žarki vzporedni, kar pomeni da bližnji predmeti izgledajo enako veliki kot močno oddaljeni predmeti. Razdalje med točkami se tu ohranjajo, ne glede na oddaljenost od kamere. Matrika 2.6 predstavlja projekcijsko matriko za vzporedno kamero. *Desno, levo, zgo-*

*raj*, *spodaj*, *dalec* in *blizu* predstavljajo kvader, v katerem bodo vidni objekti.

$$\begin{bmatrix} \frac{2}{desno-levo} & 0 & 0 & \frac{-(desno+levo)}{desno-levo} \\ 0 & \frac{2}{zgoraj-spodaj} & 0 & \frac{-(zgoraj+spodaj)}{zgoraj-spodaj} \\ 0 & 0 & \frac{-2}{dalec-blizu} & \frac{dalec+blizu}{dalec-blizu} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Diagonalni elementi skalirajo točko, četrti stolpec pa točke premakne, iz česar je razvidno, da se razdalje med točkami res ohranjajo ne glede na oddaljenost od kamere.

Pri perspektivnih preslikavah se žarki stikajo v eni točki, kot je naprimer človeško oko. Tu se ne ohranjajo razdalje med točkami, kar pomeni, da oddaljeni predmeti izgledajo bližje skupaj, kot dejansko so. Matrika 2.7 predstavlja projekcijsko matriko za perspektivno kamero. *Razmerje* je razmerje med širino in višino slike,  $f$  je  $\sin(\frac{kotpogleda}{2})$ , *dalec* in *blizu* pa sta bližnja in daljna ravnina. Skupaj ti parametri sestavijo prisekano piramido, v kateri bodo vidni objekti.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{razmerje*f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-(dalec+blizu)}{dalec-blizu} & \frac{-2*dalec*blizu}{dalec-blizu} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Tu se točke prav tako skalirajo in premaknejo, vendar pa zaradi elementa -1 v četrti vrstici vse delimo še z oddaljenostjo od kamere, kar je pokazano v enačbah 2.8 in 2.9. Zaradi lažje berljivosti so elementi matrike zapisani s črkami A, B, C in D, saj njihova vrednost ni pomembna, ker želimo pokazati le, da je položaj odvisen od oddaljenosti.

$$\begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & D \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A * x \\ B * y \\ C * z + D \\ E * z \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Vektorji za položaj morajo biti v računalniški grafiki homogeni, kar pomeni da mora četrti element biti 1, torej delimo celotno matriko z njim.

$$\begin{bmatrix} \frac{A*x}{E*z} \\ \frac{B*y}{E*z} \\ \frac{C*z+D}{E*z} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Tu je razvidno, da je x in y položaj res odvisen od oddaljenosti od kamere.

Preslikava v koordinate zaslona je dosežena z množenjem koordinat v NDC z matriko 2.10, kot je pokazano v enačbi 2.11. *Visina* in *sirina* sta dimenziji zaslonske slike.

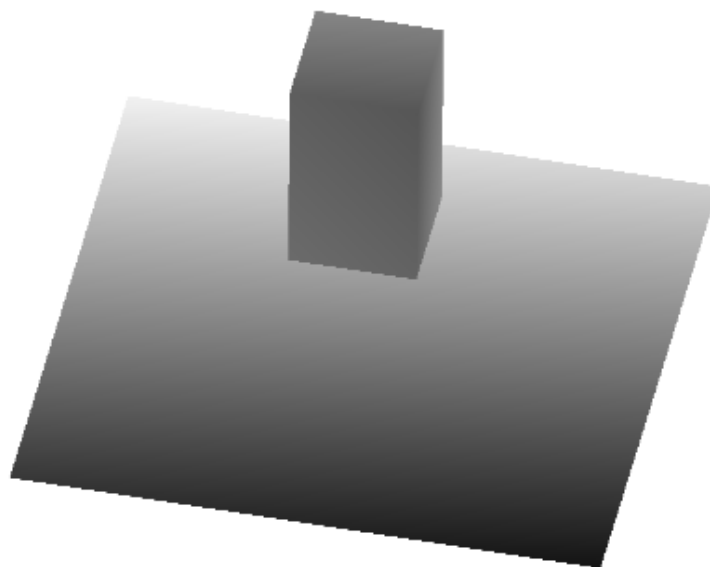
$$\begin{bmatrix} \frac{sirina}{2} & 0 & 0 & \frac{sirina}{2} \\ 0 & \frac{visina}{2} & 0 & \frac{visina}{2} \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{sirina}{2} & 0 & 0 & \frac{sirina}{2} \\ 0 & \frac{visina}{2} & 0 & \frac{visina}{2} \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} [-1, 1] \\ [-1, 1] \\ [-1, 1] \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [-1, 1] * \frac{sirina}{2} + \frac{sirina}{2} \\ [-1, 1] * \frac{visina}{2} + \frac{visina}{2} \\ \frac{[-1, 1]}{2} + 0.5 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0, sirina] \\ [0, visina] \\ [0, 1] \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Vzporedne preslikave se uporabljajo pri izvorih svetlobe, ki so zelo oddaljeni od objektov, saj so tam žarki že skoraj vzporedni, ali v posebnih primerih, kot je rentgensko slikanje, perspektivne pa ko želimo objekte izrisati, kot jih vidimo.

### Globinska slika

Luč se v računalniški grafiki obnaša enako kot kamera. Objekte se, tako kot pri kameri, projicira v pogled luči, nato se objekte izriše, pri tem pa se beleži le razdalja od luči oziroma globina najbližjih objektov v vsaki točki. Slika 2.2 je primer izrisa globinske slike.



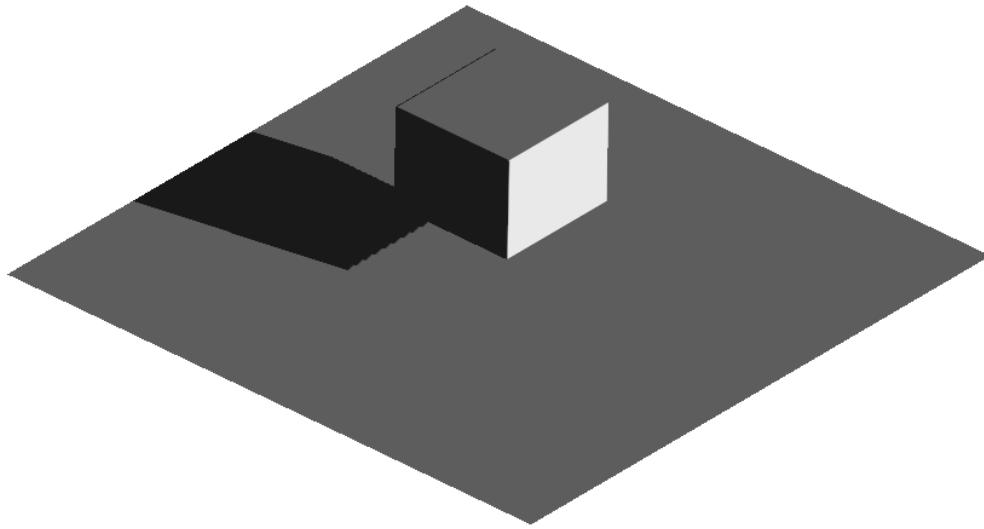
Slika 2.2: Primer globinske slike. Svetlejši kot je piksel, dlje od kamere je objekt.

### **Izris objekta s sencami**

Za izris objekta s sencami, se objekt najprej projicira v pogled kamere in pogled luči. Za vsak delec objekta v pogledu kamere se nato v globinski sliki preveri, če je ta delec viden tudi v pogledu luči. Če je delec viden, se ga osvetli z barvo luči, drugače pa je črn. Slika 2.3 je primer tako osenčenega modela.

### **Izris objekta s projicirano sliko**

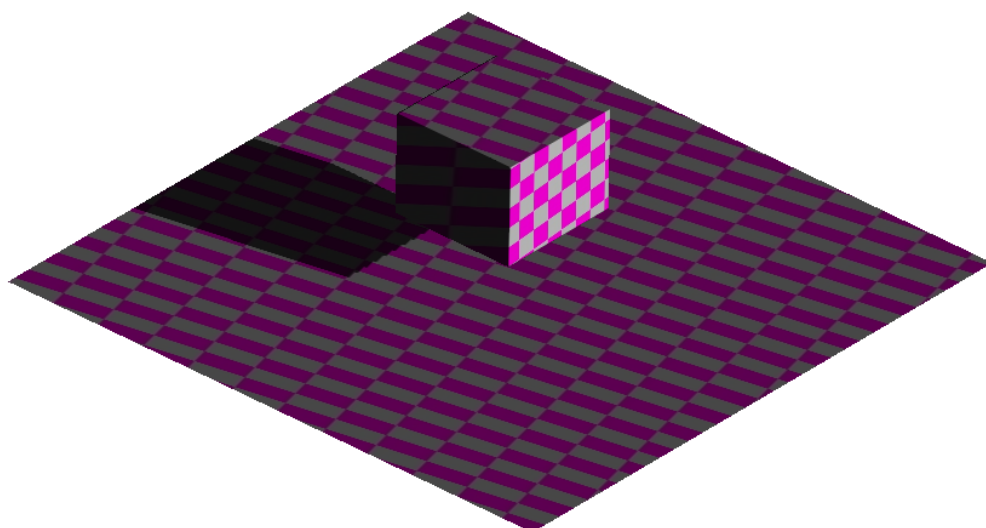
Za izris s projekcijo moramo, če je delec viden, izračunati kje v sliki se ta delec nahaja, nato pa namesto bele svetlobe vzeti barvo svetlobe, ki je na tem mestu v sliki. Slika 2.4 je primer izrisa s projicirano sliko, kjer je projicirana



Slika 2.3: Primer osenčenega modela. Luč je na desni strani pred modelom.

slika vijolično-siva šahovnica.





Slika 2.4: Primer projekcije teksture na model.



## Poglavje 3

# Implementacija

### 3.1 Programska ovojnica za LWJGL

Za lažje delo z OpenGL sem napisal programsko ovojnico, ki temelji na knjižnici LWJGL. Ovojnica nudi funkcionalnost za transformacije med kvaternioni in evklidskimi koti in razrede za transformacije in kamere. OpenGL zahteva veliko vodenja podatkov o stanju, saj je potrebno vsa sredstva, kot so medpomnilniki, senčilniki, texture in več, ročno uničiti, da se pomnilnik na grafični enoti ne zasiči. Ovojnica to poenostavi tako, da OpenGL sredstva zavije v smiselno poimenovane razrede, kar skrajša in polepša kodo. Primer okrajšave kode je prevajanje senčilnikov, kjer ovojnica več klicev za prevajanje in preverjanje napak zavije v eno samo funkcijo **prevedi** (angl. compile), prikazano v odseku kode 3.1.

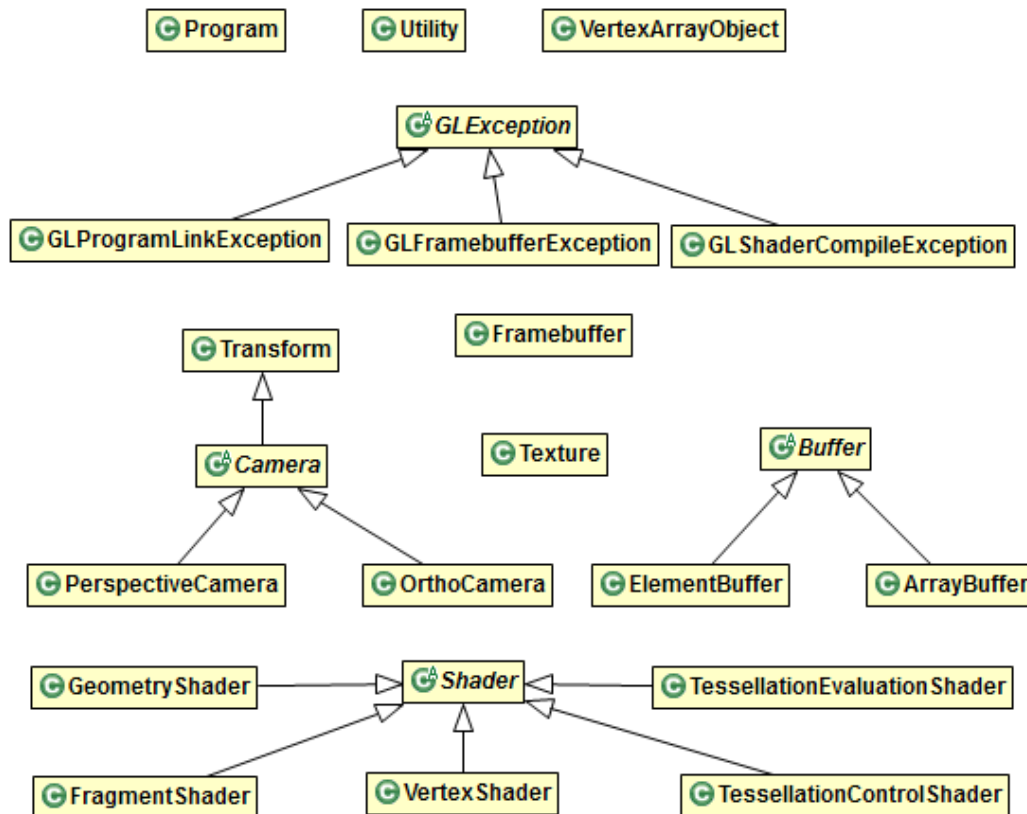
```
1 public void compile() throws GLShaderCompileException
2 {
3     GL20.glCompileShader(shaderID);
4     int compileStatus = GL20.glGetShaderi(shaderID, GL20.
        GL_COMPILE_STATUS);
5     if(compileStatus != GL11.GL_TRUE)
6     {
7         int len = GL20.glGetShaderi(shaderID, GL20.
            GL_INFO_LOG_LENGTH);
8         String infoLog = GL20.glGetShaderInfoLog(shaderID, len);
```

```

9      throw new GLShaderCompileException(infoLog);
10    }
11  }

```

Odsek kode 3.1: Funkcija za prevajanje senčilnikov s preverjanjem za napake.



Slika 3.1: Diagram dedovanja razredov v programski ovojnici. Slika je bila generirana z ObjectAid UML Explorer[7] vtičnikom za Eclipse.

### 3.1.1 Medpomnilniki

Prenašanje podatkov na grafično enoto in z nje v OpenGL poteka preko medpomnilnikov.

Uporabil sem naslednje OpenGL medpomnilnike:

**Medpomnilnik za sezname** hrani podatke potrebne za izris, kot so položaji oglišč, normale v ogliščih, teksturne koordinate in tudi poljubne podatke, ki jih definira uporabnik.

**Medpomnilnik za seznam elementov** grafični enoti pove kako se sestavljajo osnovni liki.

**Medpomnilnik za okvirje** je drugačen tip medpomnilnika, saj sam po sebi ne hrani podatkov, vendar določa kam se bodo zapisali podatki iz cevovoda za izris.

V OpenGL pa so podprti še naslednji tipi medpomnilnikov, ki so zunaj obsega predstavljenega dela: za kopiranje, za pakiranje pikslov, za poizvedbe, za teksture, za povratno informacijo o transformacijah, za enotne spremenljivke, za posreden izris, za atomarne števice, za posredno odpremo ukazov in za hranjenje senčilnikov.

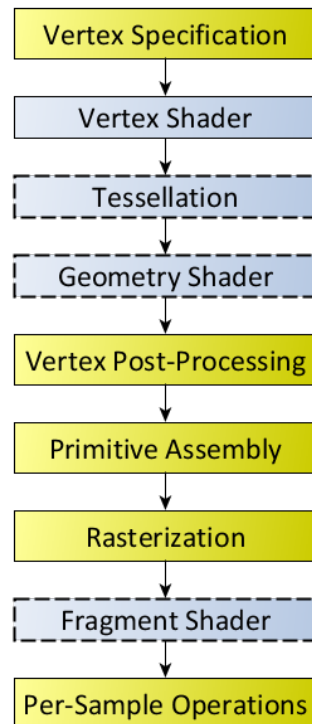
Ovojnica podpira medpomnilnike za sezname, medpomnilnike za elemente ter medpomnilnike za okvirje (angl. frame).

### 3.1.2 Senčilniki

Senčilniki so podprogrami za izris, ki jih mora napisati uporabnik. V starejših različicah OpenGL se je uporabljal fiksni cevovod za izris, v novejših različicah pa so nekateri deli programabilni. OpenGL cevovod je sestavljen iz naslednjih faz, prikazanih v sliki 3.2:

**Specifikacija oglišč** je faza cevovoda, v kateri uporabnik poda seznam oglišč in kako se združujejo v osnovne like, kot so točke, črte, trikotniki in sezname trikotnikov.

**Senčilnik za oglišča** so uporabniški podprogrami, ki izvajajo poljubne operacije nad posameznimi oglišči. Uporabnik lahko določa izhodne spremenljivke, vendar pa mora med njimi nujno biti položaj. Ta faza cevovoda je obvezna.



Slika 3.2: Skica cevovoda za izris. Rumeni pravokotniki so fiksni deli, modri pa so v novejših različicah programabilni. [11]

**Senčilnik za deljenje ploskev** je neobvezen del cevovoda. Uporabnik definira dva senčilnika, senčilnik za nadzor deljenja in senčilnik za izračun deljenja. Prvi lahko deluje samostojno, drugi pa nujno potrebuje še prvega. V senčilniku za nadzor se izračuna kako podrobno se bodo liki delili, v senčilniku za izračun pa se izračunajo novi liki.

**Senčilnik za geometrijo** so prav tako neobvezni, definira pa jih uporabnik. Kot vhodne podatke dobijo osnovne like, ki pa jih lahko zavržejo, spremenijo in delijo.

**Naknadna obdelava oglišč** je faza, v kateri se liki iz prejšnjih faz zavržejo, če ne spadajo v pogled kamere, oziramo razrežejo, če so delno v pogledu kamere. Po želji se lahko podatki tu shranijo v medpomnilnik, da jih

ni potrebno ponovno računati, če se ne bodo spreminjali.

**Sestavljanje osnovnih likov** je faza, v kateri se podatki iz prejšnjih faz pretvorijo v osnovne like, ki smo jih hoteli izrisati. Če so vhodni podatki trikotniki, želimo pa le izris črt, se bo tu vsak trikotnik razdelil v tri črte. Tu se lahko cevovod konča, če želimo le izračunati podatke za pozneje, ne pa jih tudi izrisati.

**Rasterizacija** je faza, kjer se osnovni liki razdelijo v diskretne drobce, ki služijo izračunu končne barve piksla.

**Senčilnik za drobce** izračuna barvo piksla in njegovo globina. Ta del cevovoda je neobvezen, vendar se, če ga ni, izračuna le globina drobca.

**Procesiranje drobcev** je faza kjer se, če uporabnik tako nastavi, določi kateri drobci, izmed tistih na istem položaju, se bodo obdržali glede na globino, šablono in druge lastnosti. Na koncu se barve prosojnih drobcev zmešajo, nato pa se rezultat zapiše na zaslon ali v medpomnilnik za okvirje.

Poleg teh senčilnikov OpenGL podpira še senčilnike za splošne izračune, ki pa se ne izvajajo v cevovodu in so namenjeni izračunu poljubnih podatkov.

Ovojnica podpira pet vrst senčilnikov, in sicer senčilnike za oglišča (angl. vertex shader), za geometrijo (angl. geometry), za drobce (angl. fragment) in za deljenje (angl. tessellation), senčilnik za izračunavanje (angl. compute shader) pa ni podprt. Senčilniki se združujejo v programe, ki tvorijo programabilen del cevovoda za izris.

### 3.1.3 GLSL

GLSL (angl. OpenGL shading language) je programski jezik za pisanje senčilnikov v OpenGL. Osnovan je na sintaksi jezika C. Koda se prevede na grafični procesni enoti, prevajalnik pa napiše vsak proizvajalec programske opreme, kar omogoča enako kodo na različnih tipih programske opreme. Ker se koda ne izvaja na procesni enoti, je neodvisna od operacijskega sistema.

V OpenGL so GLSL leta 2004 vpeljali z OpenGL različico 2.0. V diplomski nalogi sem uporabljal različico 3.3, trenutna najnovejša pa je 4.5.

```
1 #version 330
2
3 in vec3 UV_frag;
4
5 uniform sampler2D projectionTexture;
6 uniform float transparency = 0.3;
7
8 void main()
9 {
10     vec4 color = vec4(texture(projectionTexture, UV_frag.xy)
11                          .xyz, transparency);
12     gl_FragColor = color;
13 }
```

Datoteka 3.2: Primer preprostega senčilnika za drobce.

V datoteki 3.2 je primer senčilnika za drobce, napisanega v GLSL. Senčilnik je napisan v GLSL različici 3.3. Kot vhodni parameter dobi koordinato drobca na teksturi v spremenljivki *UV\_frag*. Tekstura in prosojnost sta v vseh senčilnikih enaka, saj sta definirani kot *uniform*. Če prosojnost ni nastavljena se nastavi na privzeto vrednost 0.3. Barva texture se prebere iz texture na položaju, vsebovanem v *UV\_frag*, s funkcijo *texture*. *gl\_FragColor* je rezervirana GLSL spremenljivka, v katero se shrani končna barva, izračunana v senčilniku.

## Teksture

Teksture v OpenGL so objekti, ki vsebujejo eno ali več slik, ter so uporabni kot vir slikovnih podatkov v senčilnikih ali kot tarča za izris v medpomnilnikih za okvirje. Ker je inicializacija texture v OpenGL precej kompleksna, ovojnica poskrbi za inicializacijo osnovnih parametrov.

OpenGL podpira naslednje tipe tekstur:

**1D, 2D in 3D texture** so texture, kjer so slike shranjene v 1, 2 ali 3



dimenzionalnih poljih.

**Pravokotne texture** so texture, ki so nujno dvodimenzionalne in imajo drugačne metode za dostop do podatkov.

**Kockaste texture** so texture sestavljene iz šestih enako velikih kvadratnih tekstur.

**Večvzorčne texture** so texture, ki za izračun vsakega piksla izračunajo več vzorcev, kar omogoča lepši izris.

**Seznami tekstur** so texture, ki vsebujejo sezname slik. Podprte so 1D, 2D, kockaste in večvzorčne texture.

Ovojnica podpira le 2D texture, ostale pa v aplikaciji niso uporabljene.

#### 3.1.4 Točkovni nizi

Točkovni nizi (angl. vertex array object) so OpenGL objekti, ki hranijo stanje potrebno za izris objektov. Hranijo le stanje, ne pa tudi samih podatkov. To pomeni reference na medpomnilnike in obliko podatkov v teh medpomnilnikih, ne pa tudi samih podatkov iz medpomnilnikov. Prednost se kaže v hitrosti izvajanja in velikosti kode, saj je potrebno veliko manj sprememb stanja.

#### 3.1.5 Transformacija

Transformacija (angl. transform) je razred, ki je namenjen hranjenju transformacije objekta, to je rotacija, položaj in velikost. Položaj in velikost sta predstavljena kot vektorja dolžine 3, rotacija pa kot kvaternion[10]. Podprte so rotacije in premiki v lokalnem ter globalnem koordinatnem sistemu, ter rotacije v poljubnem sistemu. Razred vsebuje tudi funkcije za pretvorbo iz kvaternionov v eulerjeve kote, za izračun transformacijske matrike iz stanja transformacije, ter za izračun kvaterniona iz rotacijske matrike.

Kvaternioni dolžine 1 se lahko uporabljajo za predstavitev rotacije. Problem z eulerjevimi koti je kardanska zapora, kar pomeni, da se dve osi poravnata in izgubimo eno prostostno stopnjo. Pri kvaternionih tega problema ni. Množenje kvaternionov predstavlja rotacijo, tu pa je pomemben vrstni red množenja, ker množenje kvaternionov ni komutativno.

Kot posebna transformacija se obravnava tudi kamera, le da so pri kameri premiki ravno obrnjeni, ima pa še dodatne parametre za pogled kamere. Podprti sta dve vrsti kamere: perspektivna in vzporedna.

### 3.1.6 Izjeme

Ovojnica podpira več vrst izjem. OpenGL sam ne ustavi izvajanja programa ob napaki, vendar pa je izris nepravilen, zato ob nekaterih operacijah ovojnica preverja, če je na grafični enoti vse v redu. Izjeme se lahko prožijo, ko se senčilnik ne prevede pravilno, ko se program ne poveže pravilno ali ko se medpomnilnik za okvirje ne inicializira pravilno.

### 3.1.7 Ostalo

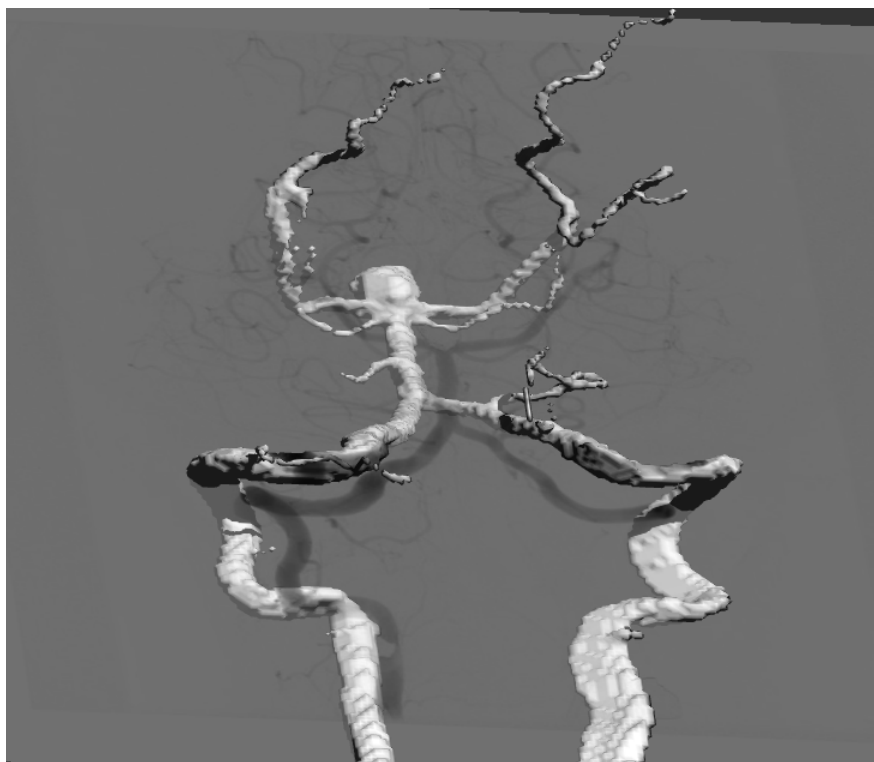
Poleg že naštetega ovojnica vsebuje še funkcijo za razhroščevanje, ki napake, ki jih vrača OpenGL, pretvori v berljive nize ter izpiše vrstico v kateri je bila funkcija klicana, kar močno olajša iskanje napak.

## 3.2 Samostojna aplikacija

Funkcionalnost orodja sem najprej implementiral kot samostojno aplikacijo, saj je tako lažje preveriti pravilnost delovanja. Aplikacija nima grafičnega uporabniškega vmesnika, implementiran pa je le osnovni uporabniški nadzor, saj služi le kot primer delovanja, ne pa tudi dejanski uporabi. Sestavljena je iz testnega razreda, razreda, ki implementira dejansko funkcionalnost, in razredov za branje Obj datotek, ki pa niso uporabljeni v končni aplikaciji, saj ima ta svoj bralnik.

Ob zagonu se ustvari okno in nastavijo osnovne OpenGL nastavitve, kot so globinski test in prosojnost. Iz testnih datotek se naložijo mrežni model in rentgenski posnetek, naložijo in prevedejo pa se tudi senčilniki. Ustvari se še medpomnilnik za okvir in njemu pripadajoča tekstura, ki bosta uporabljena za hranjenje izrisa iz pogleda projektorja.

Vsa funkcionalnost v povezavi z medpomnilniki, senčilniki, teksturami, programi, točkovnimi nizi in transformacijami je implementirana s pomočjo programske ovojnice opisane v poglavju 3.1.



Slika 3.3: Pogled samostojne aplikacije.

### 3.2.1 2D posnetek

Dvo dimenzionalni posnetek je rentgenska slika ožilja. Slika se projicira na pravokotnik, ki je prilagojen velikosti slike. Sliko se da v prostoru rotirati

neodvisno od modela, kar služi poravnavi, ko pa sta model in slika poravnana, se lahko rotira skupaj z modelom.

Ko se slika v program naloži, se najprej ustvari tekstura, nato pa se v pomnilnik grafične procesne enote naložijo podatki. Nastavi se tudi velikost pravokotnika, na katerega bo projicirana tekstura.

### 3.2.2 3D posnetek

Tri dimenzionalni posnetek je mrežni model ožilja, naložen iz Obj datoteke. 3D posnetek se sam po sebi ne premika, premika se le kamera, kar pa da uporabniku podoben vtis.

Ko se mrežni model naloži v program, se ustvarijo medpomnilniki za seznam oglišč, za normale in za seznam elementov. V grafični pomnilnik se nato naložijo podatki, v točkovni niz modela pa se shrani stanje, potrebno za izris.

### 3.2.3 Premikanje pogleda

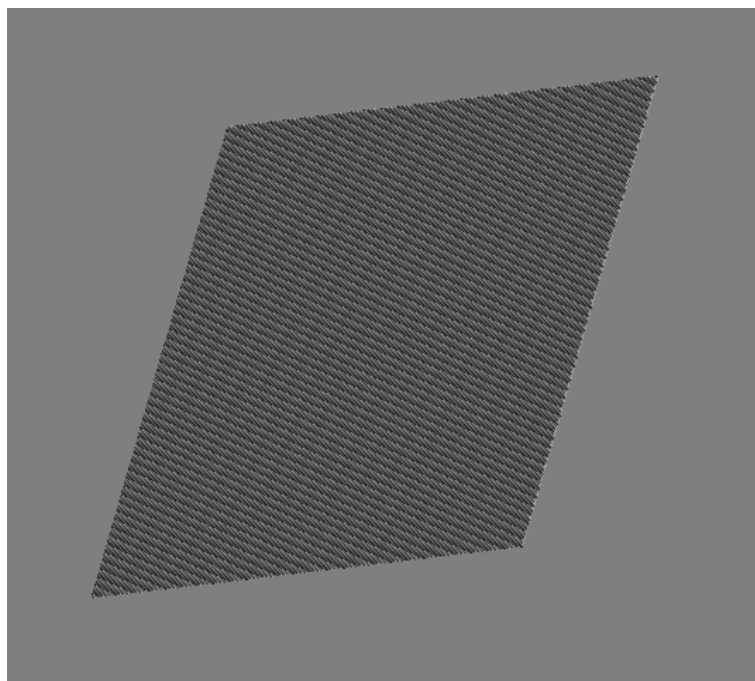
Aplikacija podpira dva pogleda, pogled iz kamere ter pogled iz projektorja. Pogled iz kamere je glavni pogled, v katerem naj bi si uporabnik ogledoval model, na katerega je projicirana tekstura. V tem pogledu je mogoče s kamero poljubno premikati in krožiti okrog modela in projektorja, medtem ko sta ta pri miru. Pogled iz projektorja je namenjen poravnavi projicirane teksture z modelom. V tem pogledu se prizorišče izrisuje iz iste smeri kot sveti projektor, s premikanjem le-tega pa uporabnik poravnava 2D in 3D posnetka.

### 3.2.4 Izris

Izris je deljen na dva dela. V prvem delu se model izrisuje v globinsko teksturo, v drugem delu pa se izriše model, nanj pa se projicira tekstura. Prvi del se izrisuje le, če je bil med prejšnjim in trenutnim izrisom premaknjen projektor, saj drugače ni smiselno izrisovati, ker ni sprememb. Drugi del se

izrisuje, če je bila premaknjena kamera ali pa projektor, saj se bo premaknil ali model ali pa projekcija nanj.

V prvem delu se za tarčo izrisa nastavi medpomnilnik za okvir, ki hrani globinsko teksturo, naloži se stanje iz točkovnega niza za model in nastavijo se parametri OpenGL programa za izris. Model se izriše, pri tem pa se porežejo prednje ploskve modela, saj to zaradi omejitve natančnosti zapisa števil v računalniku povzroča artefakte pri izrisu, kot prikazuje slika 3.5. Za izris je uporabljen OpenGL program, ki zapiše le globino.



Slika 3.4: Pravokotnik na sliki je popolnoma raven in ni teksturiran, vendar pa zaradi nenatančnosti predstavitve podatkov izgleda, kot da meče senco nase v valovnatem vzorcu.

V drugem delu se nastavita teksturi za globino in projekcijo, nastavijo se parametri OpenGL programa in naloži se stanje iz točkovnega niza za model. Za izris modela je uporabljen OpenGL program, ki na model projicira teksturo rentgenske slike. Če uporabnik želi, se nastavijo podatki in se izriše

pravokotnik s teksturo ožilja, ki služi za pomoč pri poravnavi modela in slike. Ta kvader se izriše z OpenGL programom za teksturirane objekte.

### 3.2.5 OpenGL programi

V aplikaciji sem uporabil 6 senčilnikov, ki skupaj tvorijo 3 OpenGL programe. Najosnovnejši je program za beleženje globine, ki je potreben za metanje senc, sledi mu program za izris modela s teksturo, temu pa program za izris modela s projicirano teksturo.

#### Program za beleženje globine

Program za beleženje globine je sestavljen iz senčilnika za oglišča in senčilnika za drobce. Senčilnik za oglišča dobi kot vhodni parameter položaj oglišča in matrike za preslikavo iz koordinatnega sistema modela v koordinatni sistem zaslona. Kot izhodni parameter da le nov položaj oglišča. Senčilnik za drobce nato zabeleži globino drobca, barvo pa ignorira.

#### Program za izris modela s teksturo

Ta OpenGL program se uporablja za izris pravokotnika, ki služi poravnavi ožilja in texture. Sestavljen je iz dveh senčilnikov, senčilnika za oglišča in senčilnika za drobce. Prvi vzame kot vhodne parametre koordinate oglišča in matrike za preslikavo iz koordinatnega sistema modela v koordinatni sistem zaslona, kot izhod pa poda nov položaj oglišča. Senčilnik za drobce dobi kot dodatne vhodne parametre še teksturno koordinato drobca, njegovo prosojnost ter teksturo. Kot izhod zapiše barvo texture na položaju, ki ga določa vhodni parameter.

#### Program za izris modela s projicirano teksturo

Tudi ta OpenGL program je sestavljen iz dveh senčilnikov, prvi za oglišča, drugi za drobce. Senčilnik za oglišča dobi kot vhodne parametre položaj in normalo oglišča, smer luči ter matrike za preslikavo oglišč iz koordinatnega

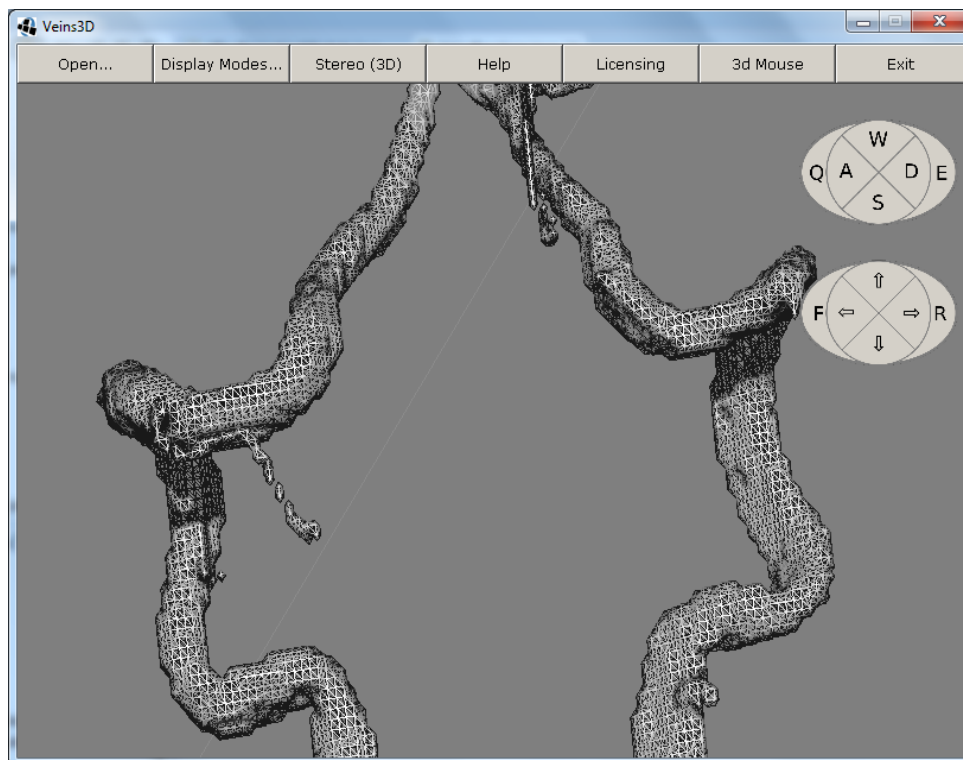
sistema modela v koordinatni sistem zaslona iz pogleda kamere in iz pogleda projektorja. Izhodi so položaj oglišča iz obeh pogledov ter normale. Vhodi v senčilnik za drobce so poleg izhodov iz prejšnjega senčilnika še teksturi s sliko in globino ter razmerje širine in višine med zaslonom in projicirano teksturo. Koordinate v teksturama senčilnik izračuna tako, da najprej koordinate v pogledu projektorja pomnoži z razmerjem med velikostjo slike in zaslonom, nato pa jih v koordinate zaslona spremeni z matriko 2.10. Če je trenutni drobec viden iz pogleda projektorja, se s skalarnim produktom med smerjo svetlobe in normalo izračuna intenzivnost svetlobe projektorja, iz teksture z rentgensko sliko pa se vzame njegova barva. Če drobec ni viden, se pobarva rdeče. Izhod iz tega senčilnika je barva.

### 3.3 Integracija v aplikacijo za vizualizacijo

Za konec sem funkcionalnost integriral še v aplikacijo za vizualizacijo. Poleg funkcionalnosti samostojne aplikacije je bilo potrebno zagotoviti, da se modul obnaša čim bolj podobno že obstoječi aplikaciji. Potrebno je bilo prirediti funkcionalnost za nalaganje datotek in premikanju pogleda. Težav pri integraciji praktično ni bilo, v veliki meri zaradi predhodne samostojne aplikacije.

#### 3.3.1 Premikanje pogleda

Model žil se premika enako kot v že obstoječi aplikaciji, s smernimi tipkami za premik levo, desno, naprej in nazaj ter s tipkami 'r' in 'f' za gor in dol. Obrača se s tipkami 'w', 'a', 's', 'd', 'q' in 'e' ter z miško, tako da se lev miškin gumb drži nad objektom in miško premika. Premikanje z miško je, podobno kot v že obstoječi aplikaciji, narejeno s projekcijo kazalca na navidezno kroglo okoli modela, vendar pa uporabljajo senčilniki v obstoječi aplikaciji perspektivno projekcijo, kamera v dodatni funkcionalnosti pa uporablja ortografsko projekcijo, zato je izračun nekoliko drugačen.



Slika 3.5: Končni izgled aplikacije med izrisom mreže modela.

### 3.3.2 Nalaganje datotek

Funkcionalnost za nalaganje datotek je obstajala že v osnovni aplikaciji. Uporabnik s pritiskom na gumb 'odpri' dobi pojavno okno, v katerem izbira datoteke. Podprti formati so bili Mhd za volumetrične datoteke, ter Obj za mrežne modele. Moral sem dodati še možnost za nalaganje slikovnih datotek v standardnih formatih Jpeg in Png [9]. Java podpira ta dva formata v svoji standardni knjižnici, tako da je bila implementacija preprosta.



## Poglavje 4

# Zaključek

V diplomskem delu sem implementiral projekcijo 2D rentgenske slike na 3D mrežni model. Vhodni podatki so mrežni modeli v datotekah tipa Obj in rentgenske slike tipa obj. Mrežni modeli so bili pretvorjeni iz Mhd datotek v mrežne modele v okviru že obstoječe aplikacije NeckVeins.

Implementacija je bila napisana v programskem jeziku Java, kar je omogočilo brezhibno integracijo v že obstoječo aplikacijo. Za lažji in hitrejši razvoj sem razvil še programsko ovojnico za LWJGL, ki hrani stanje OpenGL objektov in ima bolj berljivo poimenovane funkcije. Za hitrejši izris sem uporabil OpenGL funkcionalnost senčilnikov.

V okviru nadaljnjega dela bi lahko implementiral algoritem za avtomatsko poravnavo 2D in 3D posnetkov [15].



# Literatura

- [1] Directx. <https://en.wikipedia.org/wiki/DirectX>. Dostopano 6.9.2015.
- [2] Eclipse. <https://eclipse.org/>. Dostopano 6.9.2015.
- [3] Java. <https://www.java.com/en/>. Dostopano 6.9.2015.
- [4] Jpeg format specification. <http://www.w3.org/Graphics/JPEG/jfif3.pdf>. Dostopano 7.9.2015.
- [5] Mhd format specification. <http://www.itk.org/Wiki/MetaIO/Documentation>. Dostopano 7.9.2015.
- [6] Object format specification. <http://www.martinreddy.net/gfx/3d/OBJ.spec>. Dostopano 7.9.2015.
- [7] Objectaid uml explorer. <http://www.objectaid.com/>. Dostopano 7.9.2015.
- [8] Opengl. <https://www.opengl.org/about/>. Dostopano 6.9.2015.
- [9] Png format specification. <http://www.w3.org/TR/PNG/>. Dostopano 7.9.2015.
- [10] Quaternion. [https://en.wikipedia.org/wiki/Quaternions\\_and\\_spatial\\_rotation](https://en.wikipedia.org/wiki/Quaternions_and_spatial_rotation). Dostopano 7.9.2015.
- [11] Rendering pipeline overview. <https://www.opengl.org/wiki/File:RenderingPipeline.png>. Dostopano 7.9.2015.

- [12] Tiobe index. <http://www.tiobe.com/index.php/content/paperinfo/tpci/index.html>. Dostopano 7.9.2015.
- [13] Žagar Simon. Vizualizacija žil tilnika z opengl-om, september 2012.
- [14] Sodja Anže. Segmentacija prostorskih medicinskih podatkov na gpe, september 2013.
- [15] U. Mitrović, Z. Spiclin, B. Likar, and F. Pernus. 3d-2d registration of cerebral angiograms: A method and evaluation on clinical images. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, (8):1550–1563, August 2013.