

# Specijalni efekti kod 3D modeliranja

---

**Retkovic, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka / Sveučilište u Rijeci**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:195:077129>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Informatics and Digital Technologies - INFORI Repository](#)





Sveučilišni prijediplomski studij Informatika

Ivan Retkovic  
Specijalni efekti u računalnoj grafici  
Završni rad

Mentor: Izv.prof.dr.sc. Martina Holenko Dlab

Rijeka, rujan 2024.

Rijeka, 27.5.2024.

## Zadatak za završni rad

Pristupnik/ica: Ivan Retkovic

Naziv završnog rada: Specijalni efekti kod 3D modeliranja

Naziv završnog rada na engleskom jeziku: Special effects in 3D modeling

Sadržaj zadatka:

U radu je potrebno opisati različite specijalne efekte koji se primjenjuju u kontekstu računalnog modeliranja te prikazati različite primjere korištenja specijalnih efekata.

Mentor/ica:  
Izv. prof. dr. sc. Martina Holenko Dlab



Voditelj za završne radove  
Izv. prof. dr. sc. Miran Pobar



Zadatak preuzet: 27.5.2024.

\_\_\_\_\_  
(potpis pristupnika/ice)

## Sažetak

Završni rad pod naslovom Specijalni efekti u računalnoj grafici istražuje ključne tehnike korištenja specijalnih efekata u računalnoj grafici, s fokusom na preslikavanje tekstura, napredne tehnike renderiranja i post-processing efekte. Glavni cilj rada bio je prikazati kako se složeni vizualni efekti koriste za postizanje realizma u digitalnim slikama i animacijama. Metodologija uključuje detaljno objašnjenje procesa teksturiranja, uzorkovanja i filtriranja, kao i analizu sustava čestica i post-processing efekata poput zamućenja i sjena. Rezultati pokazuju da su specijalni efekti neizostavan dio moderne filmske i industrije igara, a optimizacija ovih tehnika ključna je za postizanje visokokvalitetne grafike uz očuvanje performansi. U zaključku, rad naglašava buduće smjerove razvoja u ovom području, uključujući primjenu umjetne inteligencije i strojnog učenja za još realističnije efekte.

Ključne riječi: specijalni efekti; računalna grafika; teksturiranje; renderiranje; post-processing; sustav čestica; optimizacija; CGI.

## Sadržaj

<b>1. Uvod.....</b>	<b>6</b>
1.1. Definicija specijalnih efekata .....	6
1.2. Povijest i razvoj specijalnih efekata.....	6
<b>2. Osnove preslikavanja teksture .....</b>	<b>8</b>
2.1. Što je preslikavanje teksture? .....	8
<b>3. Napredne tehnike preslikavanja teksture.....</b>	<b>9</b>
3.1. Teksturane projekcije .....	9
3.2. Uzorkovanje i filtriranje teksture .....	13
3.2.1. Uvećanje teksture .....	13
3.2.2. Umanjenje teksture .....	13
3.3. Kompresija teksture.....	14
3.4. Animacija teksture .....	14
3.5. Preslikavanje materijala .....	14
3.6. Preslikavanje prozirnosti.....	15
3.7. Preslikavanje svjetlosti.....	15
3.8. Preslikavanje okoline.....	17
3.9. Preslikavanje nepravilnosti.....	17
3.9.1. Preslikavanje normalna .....	20
3.9.2. Preslikavanje neravnina i okoline.....	21
3.9.3. Preslikavanje reljefa .....	21
3.9.4. Preslikavanje pomaka .....	21
<b>4. Efekti u renderiranju.....</b>	<b>22</b>
4.1. Magla.....	22
4.2. Tehnike panoa .....	23
4.2.1. Pano poravnat sa zaslonom.....	23
4.2.2. Globalno orijentirani pano .....	24
4.2.3. Osni pano .....	24
<b>5. Sustavi čestica .....</b>	<b>25</b>
<b>6. Post-processing efekti .....</b>	<b>27</b>
6.1. Efekti obrade slike.....	27
6.2. Zrcaljenje.....	29
6.3 Sjene .....	31
<b>7. Optimizacija specijalnih efekata.....</b>	<b>32</b>
<b>8. Zaključak .....</b>	<b>33</b>
<b>9. Bibliografija .....</b>	<b>34</b>

<b>10. Popis slika .....</b>	<b>35</b>
<b>11. Prilozi.....</b>	<b>36</b>

# 1. Uvod

## 1.1. Definicija specijalnih efekata

Specijalni efekti odnose se na efekte koje nije moguće stvoriti u normalnim uvjetima već je za njihovo stvaranje potrebna računalna podrška. Neki od primjera specijalnih efekata bila bi eksplozija, crvotočina u svemiru, te dodavanje ili brisanje nekih objekata iz scene, naravno to je tek nekoliko efekata. Drugi naziv za specijalne efekte je SFX ili SPFX, danas se u praksi pogotovo u filmskoj industriji u nešto većoj količini koriste računalno stvarani efekti, bolje poznati pod kraticom CGI. "Zastarjelost" specijalnih efekata donio je razvoj računala no i dalje se koriste pogotovo u kombinaciji sa CGI-jem upravo iz razloga što je granicu između toga dvoje teško za odrediti. Kada govorimo o specijalnim efektima u okviru računalne grafike zapravo govorimo upravo o računalno generiranim specijalnim efektima odnosno CGI-ju [2].

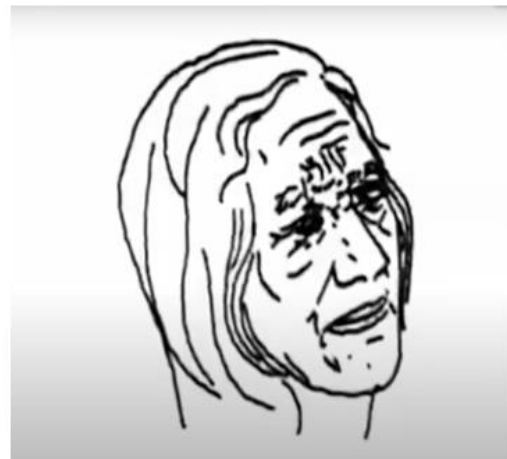
## 1.2. Povijest i razvoj specijalnih efekata

Početak specijalnih efekata smatra se 1856 godina tj. kada je Oscar Gustav Rejlander napravio tada jedinstvene trik fotografije naime imao je 30 negativa slika te je njihove dijelove kombinirao u jednu sliku. 1895 godine pionir u svom području Alfred Clark prilikom snimanja scene u kojoj su trebali odrubiti glavu škotske kraljice Marije Stuart napravio je prvi specijalni efekt za pokretne slike. To je postigao navještavajući glumce u pozu prije nego što se kraljici odječe glava nakon čega je svim glumcima naredio da se ne miču te je glumicu Marije Stuart zamijenio lutkom te njoj odrubio glavu. Godinu dana nakon njega slično je napravio i Georges Melies čiji se fotoaparat zaglavio prilikom snimanja ulice u Parizu, prilikom reprodukcije shvatio je da se kamion pretvorio u mrtvačka kola, muškarac pretvorio u ženu te pješak promijenio smjer.

Ako govorimo o računalno generiranim specijalnim efektima tada za početak uzimamo 1950-e godine i film Vertigo režiran od strane Alfreda Hitchcock-a, on je tada uz pomoć John Whitney-a i Saul Bass-a napravio uvodnu špicu vidljivu na slici 1. Uvodna špica sadržavala je spirale koje nastaju i nestaju kako bi prenijele cijeli pomalo čudni osjećaj kakva je i sami film. Kasnije je 1960-ih buknuo to područje pa smo tako vrlo brzo dobili i prvu simulaciju zrakoplova, realističnu računalnu animaciju, prvi morfing koji se prikazuje na slici 2. te prvog CGI lika koji govori [3].



Slika 1: Uvodna špica Vertigo filma (<https://youtu.be/GQwp6M2q1NE>)



Slika 2: Morfing ljudskog lica (<https://youtu.be/CCUZWSrwtgI>)



## 2. Osnove preslikavanja teksture

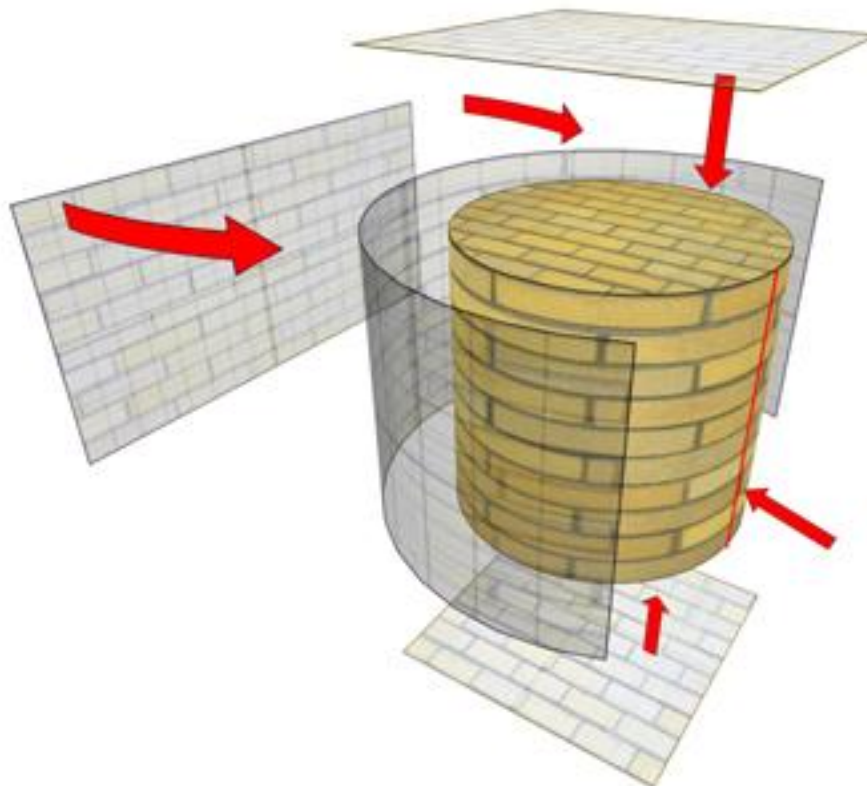
### 2.1. Što je preslikavanje teksture?

Preslikavanje teksture (engl. *texture mapping*) odnosi se na proces u kojem se uzorak to jest tekstura preslikava na površinu predmeta, uzorak koji preslikavamo može doći iz slike, iz funkcije ili iz bilo kojeg drugog izračuna. Prilikom preslikavanja objektu se mijenjaju neki od parametara kao što su na primjer boja, svjetlina, prozirnost... . Proces preslikavanja možemo podijeliti na 4 manja procesa. Prvi je projekcija u parametarski prostor to jest proces u kojem određujemo položaj točaka površine te ih projiciramo u parametarski prostor koji sadrži teksturne koordinate odnosno  $u$  i  $v$  koordinate. Parametarski prostor najčešće je dvodimenzionalan no on može biti i jednodimenzionalan pa tada imamo samo  $u$  koordinatu te je on na primjer pogodan za prikazivanje visina pomoću boja, ali on može biti i trodimenzionalan pa tada imamo  $u$ ,  $v$ , i  $w$  koordinate. Trodimenzionalnim parametarskim prostorom prikazujemo trodimenzionalne strukture kao što su na primjer drvo, mramor, kamen ili neke slične. Nakon projekcije u parametarski prostor imamo funkciju korespondencije odnosno proces u kojem se te teksturne koordinate „prebacuju“ u prostor teksture iz parametarskog prostora. Glavna razlika između ta dva prostora je upravo u tome što koordinate u teksturnom prostoru zauzimaju vrijednosti od nula do jedan dok su u parametarskom prostoru one proizvoljne. Nakon funkcije korespondencije imamo proces odnosno korak koji se naziva dohvat teksela te on dohvaća texsel, točku teksture koju smo u prethodnom koraku izračunali i nakon što je dohvatimo prelazimo na zadnji korak odnosno primjenu teksela. Primjena teksela odnosi se upravo na to na koji način taj texsel utječe na teksturu predmeta. Bitno je na kraju naglasiti da se svi ti procesi obavljaju prilikom procesa rasterizacije [1].

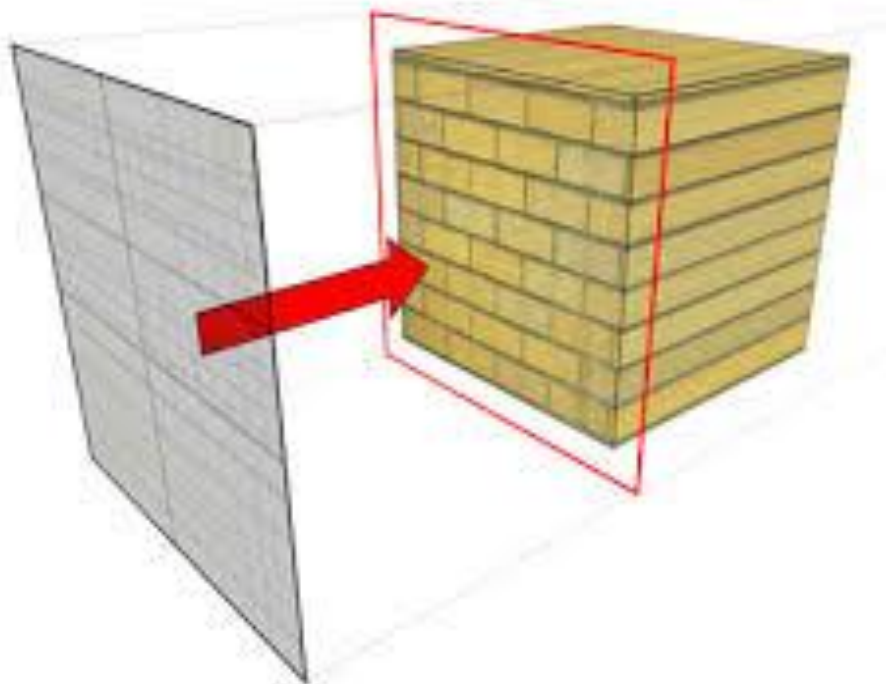
## 3. Napredne tehnike preslikavanja teksture

### 3.1. Teksturane projekcije

Teksturane projekcije možemo podijeliti na ortogonalnu, cilindričnu i kuglastu projekciju. Kod ortogonalne projekcije vrhovi se na početku preslikavaju u koordinatni sustav, z-os ispuštamo jer gledamo od gore na neki način te onda samo vidimo x i y osi čije koordinate koje uzimamo kao u i v koordinate uz elementarne transformacije ako je potrebno, primjer ortogonalne projekcije vidi se na slici 4. Cilindričnu projekciju najlakše je objasniti na način da zamislimo sliku koju omotamo u obliku valjka oko objekta te sliku tada preslikavamo na objekt pomoću normale na valjak. To dobijemo uzimanjem visine i kuta kao u i v koordinate primjer cilindrične projekcije nalazi se na slici 3. Kuglasta projekcija je pak veoma slična cilindričnoj, jedina razlika je da sliku ne omotamo u valjak već u kuglu oko objekta te tako više nemamo visinu i kut kao u i v koordinate nego imamo dva kuta kao koordinate, te primjer kuglaste projekcije nalazi se na slici 5. Svaka od tih projekcija koristi se kada je najprikladnija za objekt na primjer na plohu, kvadar ili kocku ćemo projicirati ortogonalnom projekcijom, na valjak cilindričnom te na sfere ćemo teksture projicirati kuglastom [1].



Slika 3: Cilindrična projekcija (<https://help.disguise.one/en/Content/3D-Workflow/Projection-Examples/Cylindrical-mapping.html>)



Slika 4: Ortogonalna projekcija (<https://help.disguise.one/en/Content/3D-Workflow/Projection-Examples/Planar-mapping.html>)



Slika 5: Kuglasta projekcija  
([https://learn.foundry.com/modo/content/help/pages/shading\\_lighting/s\\_hader\\_items/projection\\_type\\_samples.html](https://learn.foundry.com/modo/content/help/pages/shading_lighting/s_hader_items/projection_type_samples.html))

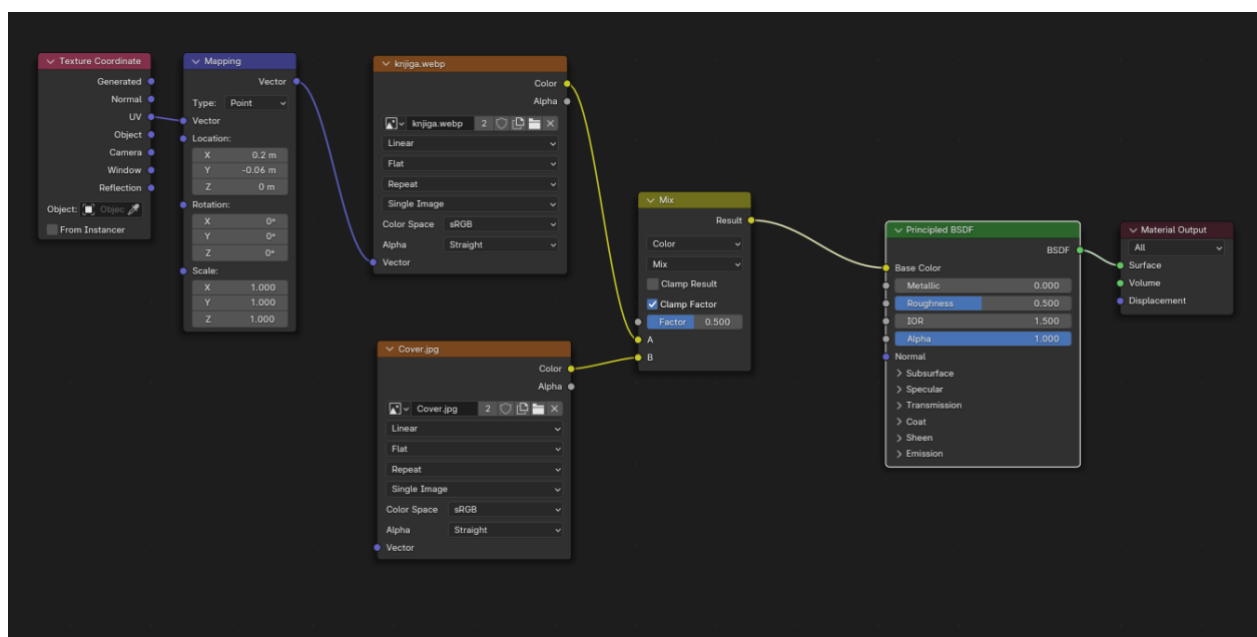


*Slika 6: Primjer multitekturiranja*

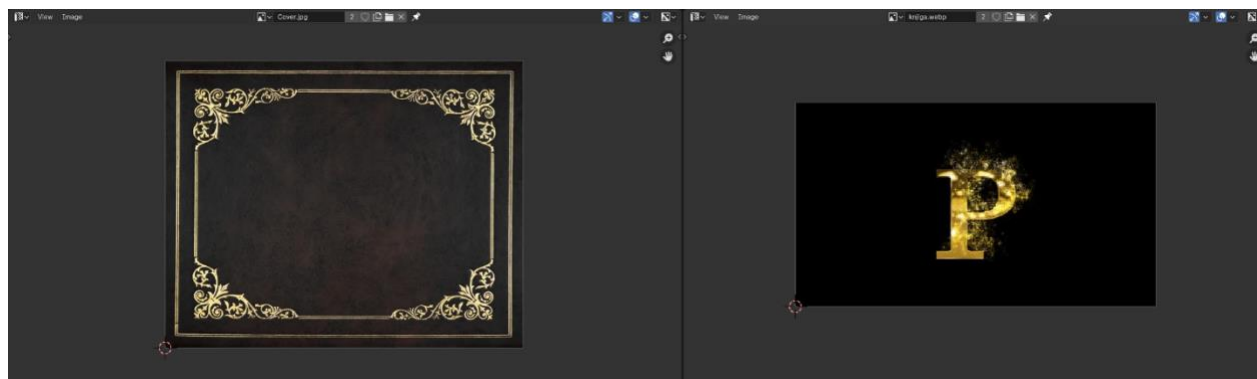


*Slika 7: Primjer mutlitekturiranja na koricama knjige*

Na prethodnom primjeru odnosno slikama 6. i 7. može se vidjeti praktičan primjer korištenja multiteksturiranja, u alatu blender napravljen je model knjige te je na korice knjige stavljena tekstura. Uz tu teksturu stavljena je i također tekstura na kojoj se nalazi zlatno slovo 'P'. Kako bi se popunio prazan prostor na koricama. Za drugu teksturu bilo je i potrebno i preslikavanje prozirnosti, o čemu će se navesti nešto više kasnije. Obje teksture su centrirane i postavljene pomoću čvora za mapiranje dok su spojene korištenjem čvora za miješanje. Slike korištenih tekstura mogu se vidjeti na slici 9, a slike proceduralnih čvorova potrebnih za izradu teksture prikazane su na slici 8.



Slika 8: Proceduralni čvorovi potrebni za prethodni primjer



Slika 9: Teksture korištene u prethodnom primjeru

## 3.2. Uzorkovanje i filtriranje teksture

Uzorkovanje i filtriranje teksture odnosi se na mapiranje teksture sa slike uz pomoć  $u, v$  koordinata kako bi se dobila vrijednost teksture. Uzimanje vrijednosti teksela donosi nam jedan problem prilikom uzorkovanja slike na temelju  $u, v$  koordinata. Na ekranu veličina slike ovisna je o njenoj udaljenosti od same kamere u 3D prostoru. S obzirom na to najkvalitetnija slika bi bila slika kojoj su veličine teksela jednake ili što sličnije veličini piksela. Pošto je to stanje rijetko da je tekstel jednake veličine kao i piksel te nam zato prilikom pomicanje kamere bliže objektu ili dalje od objekta dolazi do smanjena kvalitete, kako bi to izbjegli koristimo tehnike uvećanja i smanjenja tekstura [1].

### 3.2.1. Uvećanje teksture

Najefikasniji način za dohvaćanje tekstela je metoda najbližeg susjeda. ova metoda koristi se na način uzimanjem  $u, v$  koordinata uzorkovanja te spajajući je s vrijednosti najbližeg tekstela. Povećanjem slike dolazi do problema gdje se  $u$  i  $v$  koordinate spajaju na isti tekstel i prikazuju istu teksturu, s tim događajem dolazi do efekta prikaza blokova na slici. Kako bi izbjegli negativni učinak koristimo se metodom pod nazivom Binarna interpolacija. Binarna interpolacija izvodi se na način da se između 4 tekstela najbližih  $u$  i  $v$  koordinatama vrši interpolacija iz kojih se uzima uzorak, ona zapravo zamućuje sliku kako se ne bi vidjeli blokovi koji nastaju uvećanjem teksture. Druga metoda naziva se Bikubna interpolacija koja za razliku od Bilinearne uzima mrežu  $4 \times 4$  teksela koji su susjedni. Postupak obje metode je gotovo identičan. Rezultat dobiven metodom Bikubne interpolacije je slika koja gotovo nema efekt blokova. Obje metode uklanjaju efekt blokova no ne rješavaju problem kada na slici nedostaju detalji, to se može riješiti tako da koristimo na primjer mapu detalja o kojoj će se nešto više navesti kasnije [1].

### 3.2.2. Umanjenje teksture

Prilikom umanjenja slike problem se javlja kada 1 piksel prekriva više od 4 teksela. Rješenja problema umanjenja teksture naziva se mini mapiranje. Naziv mini mapiranje dolazi iz latinskog jezika što prijevodu znači puno toga o malom prostoru odnosno '*multum in parvo*'. Idealno rješenje tog problema bilo bi zbrojiti utjecaj teksela na svaki piksel no kako bi ta operacija bila iznimno teška za računalo koristi se skup dobro filtriranih i umanjenih kopija teksture koji se pohranjuje zajedno sa originalom, kada preslikavamo teksturu koristi se tekstel iz slike čija je veličina najbližnja veličini piksela. Tu sličnost određujemo parametrom  $d$ . Što je veći parametar  $d$  to znači da piksel prekriva veći broj teksela. Kako veća vrijednost parametra  $d$  znači manje detaljne kopije originalne teksture parametar  $d$  dobio je i naziv razina detalja. Postoje dva osnovna postupka za računanje tog parametra. Prvi postupak je računanje tog parametra pomoću četverokuta to jest njegove najdulje stranice nakon projekcije piksela tog četverokuta u prostor teksture. Druga metoda koja se zapravo češće koristi računa parametar iz vrijednosti diferencijala  $u$  i  $v$  koordinata duž koordinatnih osi zaslona [1].

### 3.3. Kompresija teksture

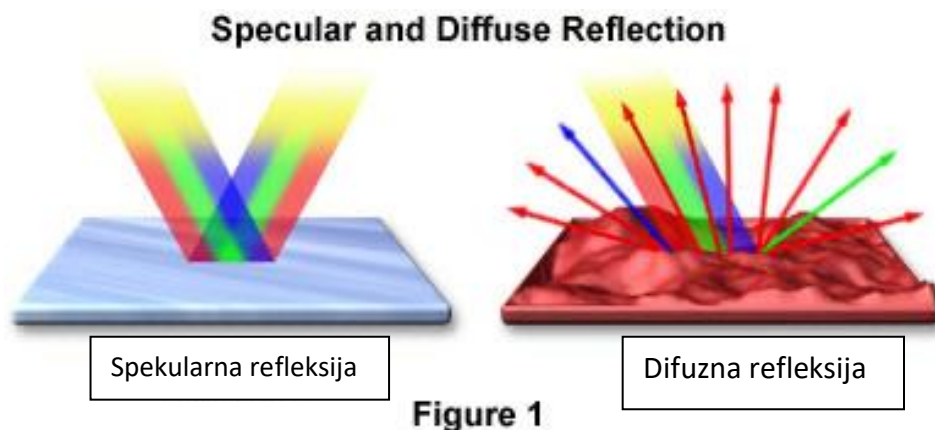
Kompresija tekstura zahtjeva posebne sheme, iz razloga što ona treba veoma brzu dekompresiju zasebnih blokova. Za kompresiju tekstura najčešće se koristi DXTC shema ona omogućuje kompresiju teksture u 4x4 blokovima teksele. Uz svaki taj blok pohranjuju se i dvije vrijednosti dok se uz svaki teksel sprema tako zvani interpolacijski faktor. Iako se uz ovu shemu slika pohranjuje s gubitcima te gubitke najčešće možemo zanemariti jer ne narušavaju značajno kvalitetu same slike [1].

### 3.4. Animacija teksture

Animacija teksture kao i bilo kakva druga animacija podrazumijeva nekakvu promjenu u vremenu tj. Animacija teksture zapravo je promjena slike teksture. Animacija teksture može se koristiti za prikaz dima, vatre, eksplozije te mnogih drugih efekata. Animirana tekstura zapravo je trodimenzionalna tekstura to jest ima i dodatnu  $w$  koordinatu uz već ranije poznate  $u$  i  $v$  koordinate, ta  $w$  koordinata služi za parametar koji se odnosi na vrijeme [1].

### 3.5. Preslikavanje materijala

Kako je ranije navedeno tekstura ne mora samo predstavljati boju nekog objekta, u teksturu možemo spremati mnogo drugih parametara materijala. U nastavku će se navesti nekoliko tekstura materijala s obzirom na parametre koje oni predstavljaju. Prvo imamo difuznu teksturu koja se koristi za prikaz difuzne svjetlosti na modelu, takva slika teksture šire je poznata kao mapa difuzije (engl. *diffuse color map*). Nakon nje imamo spekularnu teksturu tj. Sliku teksture koja prikazuje spekularnu svjetlost. Prikaz refleksija može se vidjeti na niže prikazanoj slici 9. te na kraju imamo teksturu sjaja. Tekstura sjaja podrazumijeva koeficijente sjajnosti materijala [1].



Slika 9: Prikaz razlike spekularne i difuzne refleksije  
(<https://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/reflection/specular/>)



### 3.6. Preslikavanje prozirnosti

Preslikavanje prozirnosti (engl. *alpha mapping*) odnosi te na teksturiranje objekta u kojem *alfa* parametar teksture služi za predstavljanje faktora prozirnosti za svaku točku. Imamo dva načina preslikavanja prozirnosti. Prvi poznatiji pod nazivom efekt naljepnice odnosi se na to da tekstura ima neki oblik različit od pravokutnika te da je ostatak proziran. Korištenjem toga postizemo dojam sličan lijepljenju naljepnice na objekt, pogodan je na primjer za prikaz rupa od metaka na staklu, krvi na zidu, ogrebotina na vratima auta i tako dalje. Osim efekta naljepnice prozirnost možemo primijeniti i na objekt odnosno dijelove objekta su prozirni u ovisnosti od parametra alfa. Ovaj način često se koristi za prikaz trave, drveća, grmlja no u kombinaciji sa animacijom teksture možemo dobiti i simulacije plamena, eksplozije, baklje, dima... . Za iscertavanje predmeta pomoću preslikavanja prozirnosti imamo također dva osnovna načina. Prvi način koji se zove miješanje po prozirnosti (engl. *alpha blending*) te drugi način pod nazivom provjera prozirnosti (engl. *alpha testing*). miješanje po prozirnosti podrazumijeva proces iscertavanja prozirnosti na veoma fleksibilan način te time možemo dobiti i djelomično prozirne objekte no kako miješanje po prozirnosti iscertava prozirnost za svaku točku čak i one koje su potpuno prozirne veoma je spor i zahtjevan za izvedbu. Provjera prozirnosti radi na način da računalo automatski odbaci sve točke čiji je alfa parametar manji od neke proizvoljno zadane granice, alpha parametar se inače kreće od 0 što podrazumijeva potpunu prozirnost do 1 što podrazumijeva potpunu neprozirnost. Nakon što se u provjeri prozirnosti odbace sve točke čiji je alpha parametar manji od te vrijednosti iscertavaju se samo one točke kojima je taj parametar veći. Ovaj način značajno je brži od prethodnog no samim time je i manje detaljan [1].

### 3.7. Preslikavanje svjetlosti

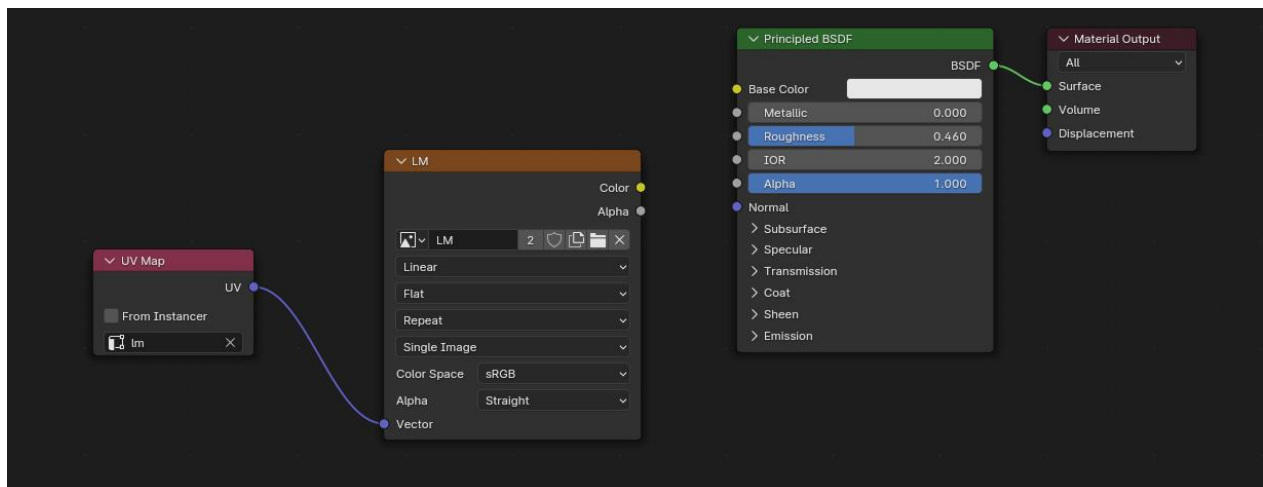
Preslikavanje svjetlosti je tehnika kod koje se koristi dodavanje teksture svjetla te se računanje odrađuje u pripreмноj fazi izrade objekta. Obzirom na to da se računanje događa u pripreмноj fazi oni ne ovise o položaju promatrača i to omogućuje neovisnost pomaka položaja promatrača, u prvoj fazi detaljno se računa osvjetljenje i sprema se u teksturu svjetla i prikazuje se u stvarnom vremenu. Preslikavanje svjetlosti koristi se za statične elemente u sceni iz razloga što je svo računanje napravljeno u pripreмноj fazi i ne računa se ponovno, a kod dinamičkih elemenata koristi se dinamički tijekom iscertavanja [1].





Slika 10: Prikaz mape korištene za preslikavanje svjetlosti

Praktični dio preslikavanja svjetlosti napravljen je na način da smo na plohu stavili šesterostranu prizmu zatim smo napravili novu UV mapu jednaku za oba modela. Plašt objekta na UV mapi smo skalirali i namjestili kako bi bili u pravilnom odnosu veličina. Nakon toga smo napravili materijal pomoću proceduralnih čvorova prikazanih niže na slici 11. te na kraju to sve *bake*-ali kako bi dobili sliku na kojoj se vidi kako svijetlo utječe na modele što se može vidjeti na slici 10.



Slika 11: Proceduralni čvorovi potrebni za preslikavanje svjetlosti

### 3.8. Preslikavanje okoline

Preslikavanje okoline (engl. *Environment mapping*) naziv je za metodu simuliranja zrcaljenja najčešće na zaobljenim površinama. Pogodna je za simulaciju metalnih i plastičnih objekata visokog sjaja. Izvodi se na način da se okolina kao slika iz perspektive objekta pohrani kao tekstura primijenjena na objekt. Kako sjajni predmeti imaju spekularni odsjaj koordinate teksture se izračunavaju tek prilikom iscrtavanja objekta iz razloga što se radi spekularnog odsjaja odsjaj koji promatrač vidi mijenja njegovim položajem u prostoru. Za izračunavanje koordinata teksture postoji nekoliko algoritama, u nastavku će se navesti dva najvažnija.

Prvo je kuglasto preslikavanje ono je najjednostavnije za preslikavanje okoline, a funkcionira na način da se oko objekta stavi savršena kugla koja na sebi ima ortografsku projekciju okoline tako da se iscrtavanje izvodi da uzmemo teksel kojem fiktivna zraka sječe kuglu.

Uz kuglasto preslikavanje drugi najvažniji algoritam je kockasto preslikavanje. Kockasto preslikavanje je najraširenija metoda za preslikavanje okoline. Iz razloga što je vrlo jednostavno za implementaciju na grafičkom sklopu računala. Funkcionira na način da se prvo generira kockasta slika okoline koja na svih šest strana ima projekciju okoline. Ta kocka je zatim postavljena kao i kugla u prethodnom primjeru preko objekta. Za sjenčanje objekta koristi se vektor reflektirane zrake za određivanje teksturnih koordinata za određivanje kockaste teksture okoline. Taj postupak u praksi ne moramo implementirati zato što u jezicima za sjenčanje već postoji funkcija za to [1].

### 3.9. Preslikavanje nepravilnosti

Preslikavanje je skup tehnika koje poremećajem normale u svakoj točki predmeta stvoriti dojam neravnih površina bez stvaranja dodatne geometrije. Korištene tehnike simuliraju hrapave ili neravne površine. Da bi se ova ideja razumjela moramo objasniti da difuzne i spekularne komponente osvjetljenja neposredno ovise o nagibu površine predmeta u promatranoj točki, dakle o normali. Primjer nepravilne površine pokazuje kako se normala mijenja od točke do točke. Kao rezultat toga, model osvjetljenja daje različite rezultate za svaku točku, što dovodi do svjetlijih i tamnijih dijelova površine ovisno o trenutnom nagibu površine u odnosu na osvjetljenje. Na ovaj način postiže se realističan prikaz nepravilne površine. Ipak, u praksi je nemoguće modelirati površinu s tolikom razinom detalja jer bi potreban broj poligona bio prevelik za iscrtavanje u stvarnom vremenu. Kod ravne površine, normala je uvijek usmjerena na isti način. Ako na ravnu površinu prenesemo smjerove normale s nepravilne površine, model osvjetljenja će dati slične rezultate kao i za nepravilnu površinu, što će rezultirati svjetlijim i tamnijim dijelovima i stvoriti dojam nepravilne površine [1].

Promjenom normale moguće je postići da ravna površina izgleda neravno, bez povećanja broja poligona. Prikaz neravnina može se vidjeti na slikama u nastavku odnosno na slikama 12. i 13. Ovo je učinkovito za manje neravnine, a rezultati su uvjerljivi sve dok se površina ne gleda pod vrlo oštrim kutom tada postaje očito da je glatka i iluzija se gubi. Podaci o poremećaju normale pohranjuju se u novu teksturu neravnina.

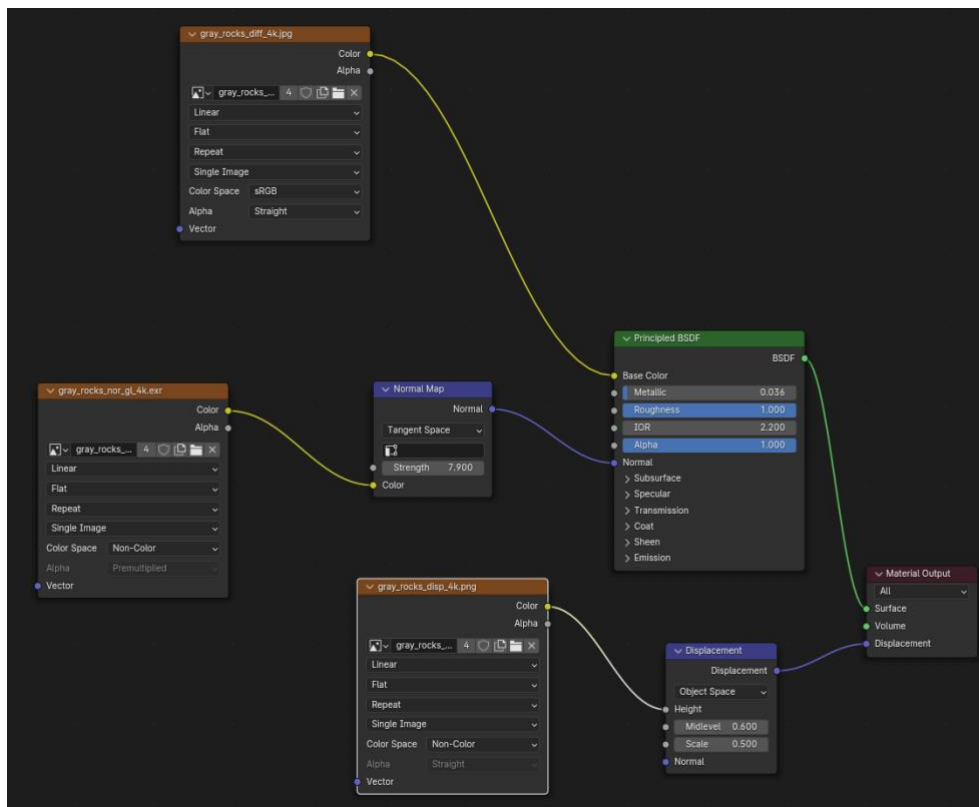


*Slika 12: Kamenje napravljeno uz pomoć, mapa normala, mapa neravnina i mapa premještanja*



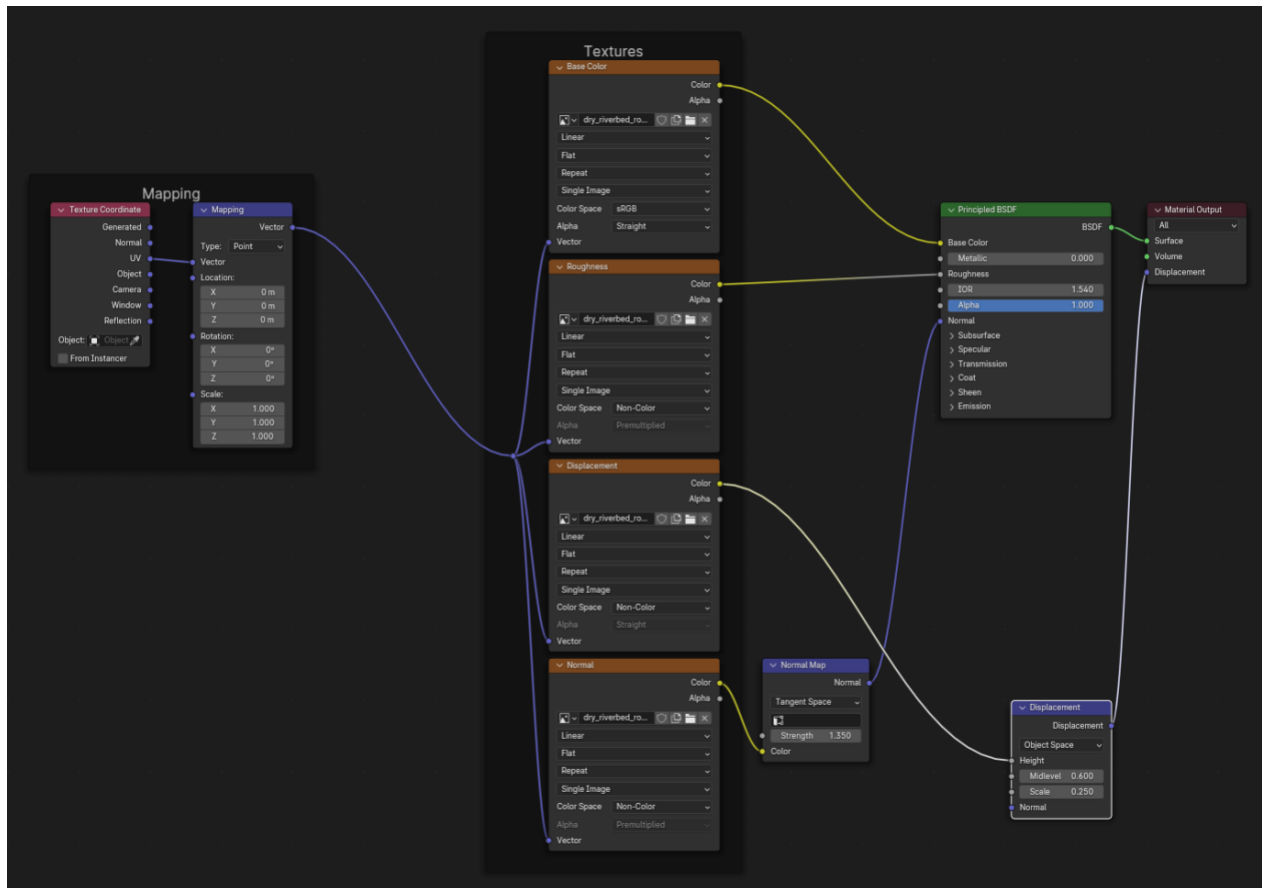
*Slika 13: Kameni spomenik napravljen pomoću multitekturiranja i UV Mapiranja*

Kamene ploče napravljene su pomoću teksture preuzete tekstuure korištenjem slike teksture, mapom normala i mapom premiještana kako bi izgledale što realnije. Za tu teksturu korišteni su čvorovi za slike normale te su ti čvorovi povezani sa BSDF proceduralnim čvorom i izlaznim čvorom na način prikazan na slici 14. niže.



Slika 14: Proceduralni čvorovi korišteni za kamene ploče

Spomenik je također modeliran u alatu blender uz pomoć raznih tehnika dok mu je tekstura preuzeta sa interneta, kako bi model izgledao što realnije korištene su razne mape koje su ranije navedene kako bi dale na realističnosti samog modela, mape i teksture mogu se vidjeti prikazom proceduralnih čvorova na slici 15. U sredini spomenika nalazi se svijetleći stup na kojem se nalazi materijal koji emitira svjetlost narančaste boje. Na spomeniku se također nalaze i stakla koja ublažuju svjetlost. Ona su napravljena na način da smo im dodali materijal za sjajnost i smanjili oštrinu kako bi dobili danu teksturu stakla.



Slika 15: Proceduralni čvorovi korišteni za materijal spomenika

### 3.9.1. Preslikavanje normalna

Danas najčešća metoda koja se koristi prilikom preslikavanja neravnina je metoda pod nazivom preslikavanje normala. Kod te metode se neravnine direktno spremaju u novu teksturu koja kasnije služi za prikaz neravnina. Takva normala na objektu služi za izračun osvjetljenje objekta. Normale se u teksturi normala mogu nalaziti u tri koordinatna sustava. Prvi je globalni koordinatni sustav no on se rijetko danas koristi te je ne praktičan, iz razloga što objekt koji ima takvu teksturu normala nije moguće micati te deformirati u sceni. Drugi i danas najčešće korišteni koordinatni sustav je tako zvani koordinatni sustav tangente. Njega definiraju tri vektora, prvi vektor je vektor tangente na površinu predmeta drugi je vektor bi tangente te treći je vektor geometrijske normale odnosno vektor okomit na površinu objekta. Oni se izračunavaju unaprijed te su pohranjeni za svaki vrh posebno, no možemo ih računati i tomom iscrtavanja. Na nize prikazanoj slici vidimo da teksturem normala prevladava plav boja to je tako iz razloga što su normale najčešće okrenute u pozitivnom smjeru iz površine, a Z se pohranjuje plavom komponentom teksela [1].

### **3.9.2. Preslikavanje neravnina i okoline**

Preslikavanje okoline dobro je kombinirati sa preslikavanjem neravnina. Ukoliko prilikom određivanja teksturnih koordinata okoline uzmemo poremećenu normalu umjesto geometrijske normale možemo dobiti efekt zrcaljenja okoline na valovitoj površini [1].

### **3.9.3. Preslikavanje reljefa**

Preslikavanje reljefa zasnovano je na teksturi visina. Funkcionira na način da od trenutne točke ide zraka na promatrača te se gleda njen presjek sa geometrijom površine. Time dobivamo uvjerljiviju simulaciju neravnina nego kod prethodnih metoda. Traži velik broj uzoraka teksture te je zato proračunski zahtjevan [1].

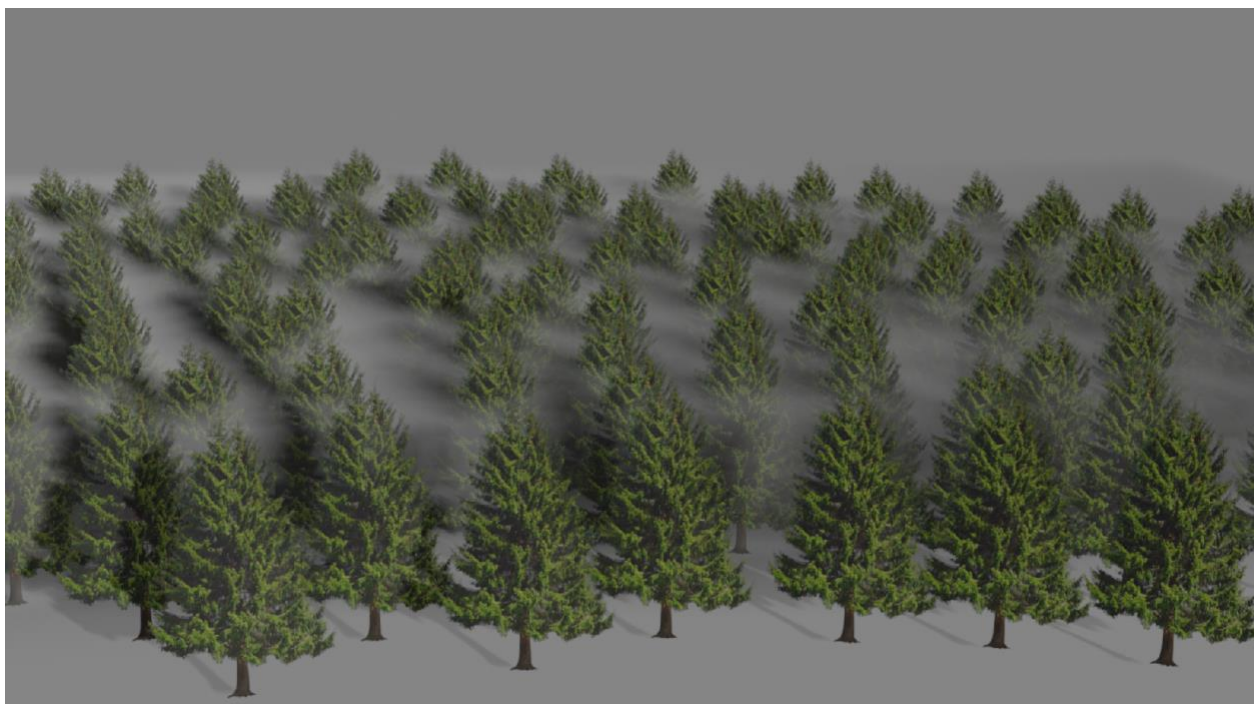
### **3.9.4. Preslikavanje pomaka**

Za razliku od ranije opisanih metoda preslikavanje pomaka ne utječe samo na algoritme sjenčanja nego i mijenja geometriju predmeta. Geometrija predmeta se mijenja na način da za svaki vrh koji čini površinu na objektu uzorkuje tekstura visina, te sa time de dobiva neravna i deformirana površina [1].

## 4. Efekti u renderiranju

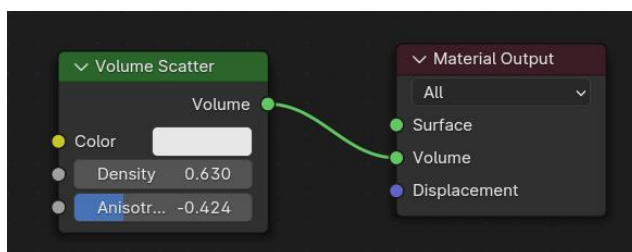
### 4.1. Magla

Iako je veoma jednostavan za izvedbu efekt magle, veoma nam je bitan u sceni kako bi ona bila što prirodnija, naime efekt magle nam daje tu prirodnu dubinu scene prikazan na slici 16.



Slika 16: Prikaz magle u Blenderu

U ovom primjeru prikazan je efekt magle, za izradu je također korišten alat blender. Efekt magle je postignut na način da je pridodan objekt u sceni kojemu smo da dodali čvor za volumen i u njemu namijesili postavke za gustoću, boju i anizotropiju<sup>1</sup> magle koje su prikazane slikom 17.



Slika 17: Prikaz čvorova dobivene magle

<sup>1</sup> Anizotropija – osobina sredstva da njegova fizička svojstva imaju različite vrijednosti odnosno o smjeru



## 4.2. Tehnike panoa

Tehnike panoa se najčešće koriste u slučaju gdje objekt mora u svakom danom trenutku bit orijentiran prema kameri, s time se dobiva efekt dubine kod slučaja sa vegetacijom ili atmosferskim efektom. Tehnike panoa dijele se na tri glavne skupine: pano poravnat sa zaslonom, globalno orijentirani pano i osni pano. U nastavku će se navesti opširnije za svaku tehniku panoa [1].

### 4.2.1. Pano poravnat sa zaslonom

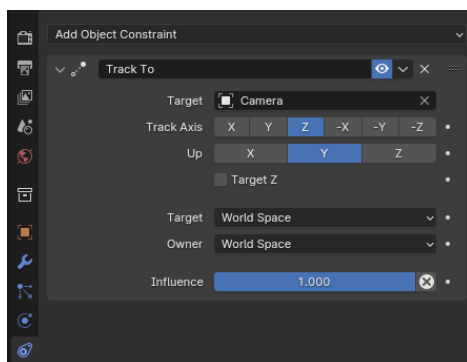
Kod efekta sa povratnim zaslonom objekt je u svakom trenutku okrenut prema kameri i najčešće se koristi za prikaz teksta. S time normala predmeta kod kojeg koristima ovu tehniku uvijek je okomita na ravninu projekcije, a vertikalna os jednaka sa vertikalnom osi kamere [1].



*Slika 18: Pano poravnat sa zaslonom*



U ovom primjeru napravljen je pano poravnat sa zaslonom. Stavljene su slike drveća koja se mogu vidjeti na slici 18. te je svaki od njih sa ograničenjem *Track To* povezan sa kamerom kako bi se prilikom pomicanja kamere okretalo i drveće odnosno slika će uvijek izgledati isto. Prikaz postavka može se vidjeti na slici 19.



Slika 19: Ograničenje korišteno za izradu panoa poravnatog sa zaslonom

#### 4.2.2. Globalno orijentirani pano

Kod globalno orijentiranog panoa koriste se objekti koji nisu radialno simetrični i imaju fizičku prisutnost u sceni. Oni se najčešće koriste za simulaciju nekog oblaka, dima, eksplozije i slično. Kod ove tehnike vertikalna os panoa je djelomično globalno orijentirana, što onemogućuje orijentaciju oko vektora pogleda, a normala objekta najčešće je okrenuta prema kameri. Kod ove tehnike panoa najčešće dolazi do iskrivljena objekata u kutovima kamere zbog perspektivne projekcije [1].

#### 4.2.3. Osni pano

Ova tehnika koristi tehniku orijentacije ali na način da je objekt djelomično ovisan o kameri, a djelomično fiksiran. Za razliku od prethodnih kada govorimo o osnim panoima govorimo o panoima koji isključivo rotiraju oko x,y,z osi. Jedan od problema ove tehnike je da se iluzija gubi u slučaju da je stajalište pogleda iznad objekta [1].

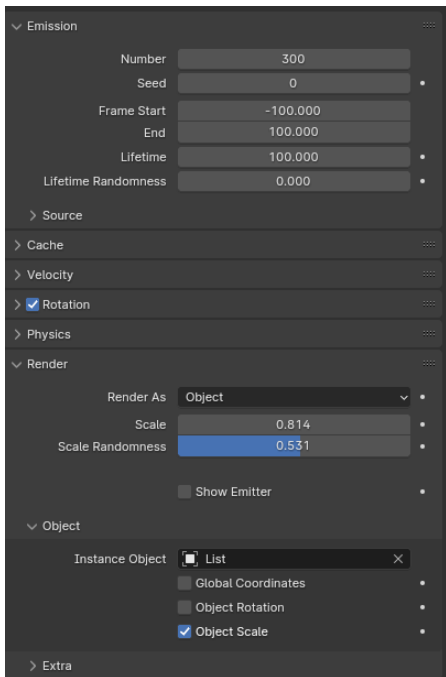
## 5. Sustavi čestica

Ponekad niz poligona nije prikladan za opisivanje određenih objekata i pojava. To su obično teško opisive pojave poput eksplozije, vatre, vodoskoka, kiše, snijega, zvijezda i sličnih fenomena. Za takve objekte ili pojave, pogodan je sustav čestica. U računalnoj grafici za prikaz sustava čestica koristi se veliki broj sitnih čestica odnosno objekata, primjer čestica odnosno objekata može se vidjeti na slici 20. kod prikaza pada lišća. Kako su ti sustavi veoma zahtjevni za procesor njihova uporaba u stvarnom vremenu dugo nije bila moguća. Kako je većina izračuna vezanih za sustave čestica prebačena na grafički procesor počeli su se sve više i više koristiti. Naravno kako bi se simulirale čestice treba ih stvoriti, animirati te uništiti. Iscrtavanje odnosno stvaranje čestica uključuje njihovo stvaranje u obliku poligonalnog objekta, točaka, kratkih linija te točkastih slika. Danas ih najčešće iscrtavamo kao točkaste slike, odnosno napravimo pano poravnat sa zaslonom te na to preslikamo teksturu. To se najčešće danas koristi iz razloga što se onda ne mora paziti na njihovu orijentaciju već samo na njihov položaj. Što se tiče animacije čestica kako bi ona bila uspješna bitan je položaj čestica i brzina čestica [1].



Slika 20: Primjer sustava čestica koristeći sliku

U ovom primjeru korišten je sustav čestica koji se sastoji od lišća koje pada. Efekt je postignut implementacijom polja sile vjetra. Na slici 21. mogu se vidjeti postavljeni parametri kako bi sustav čestica izgledao što realnije.



Slika 21: Prikaz parametra za sustav čestica

## 6. Post-processing efekti

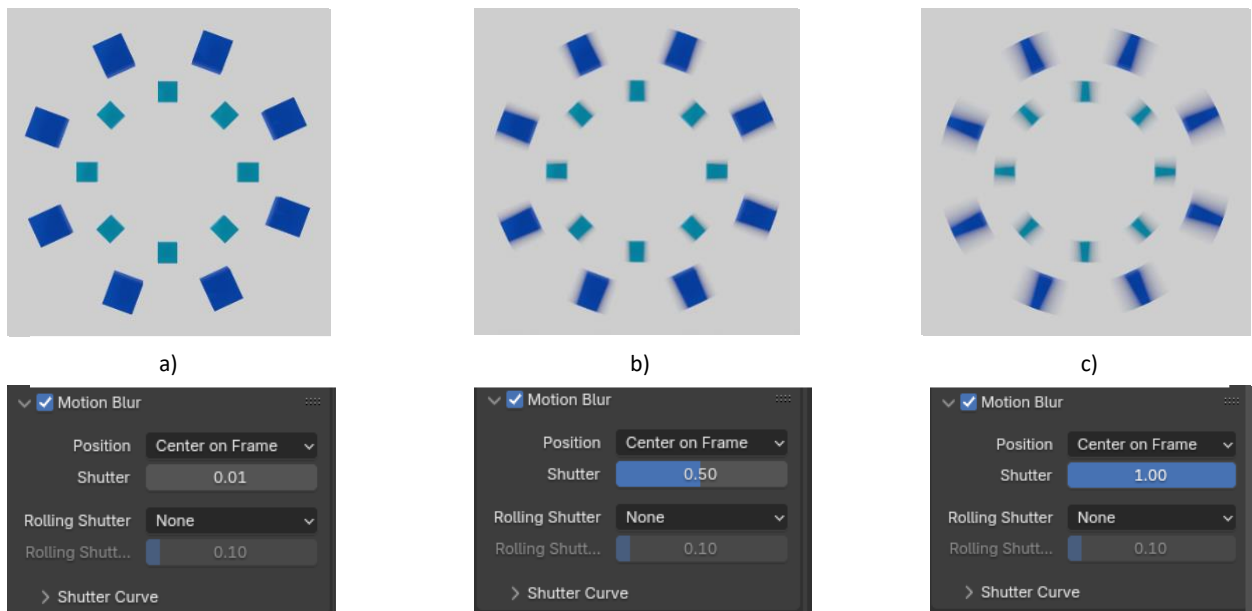
### 6.1. Efekti obrade slike

Kada govorimo o post processing efektima zapravo mislimo na efekte koje koristimo nad cijelim gotovim slikama kao bi postigli veći realizam i omekšane slike. Iako postoji skoro neograničen broj takvih efekata u nastavku će biti detaljnije obrađeni samo oni najvažniji.

Prvi takav efekt naziva se preslikavanje tonova (engl. *tone mapping*) koristimo da velik raspon osvijetljena svedemo na ograničen koji podržava nas prikazani uređaj. Najčešće koristimo globalne operacije preslikavanja tonova, kako su globalne one utječu na cijelu sliku. Najčešće korištena takva globalna operacija naziva se ograničavanje osvijetljenosti ona automatski ograničava osvijetljenost na raspon prikazanog uređaja. Sljedeća takva operacija je operacija maksimum na bijelo koja određuje zasebno osvijetljenost pojedinog piksela i onda tom vrijednosti skalira boje svih piksela ponekad ova tehnika donosi problem pre tamnih slika. Primjena preslikavanje tonova zaista je široka na primjer njome možemo prikazati svjetlosne adaptacije te se može koristiti zajedno s drugim efektima. Sljedeći takav efekt je efekt prelijevanja svjetlosti (engl. *bloom effect*) koji se odnosi na pojavu kod koje svjetlost prelazi preko granica predmeta što je moguće vidjeti na slici 22. Još jedan takav efekt naziva se zamućenost pri gibanju (engl. *Motin blur*) koji doprinosi prirodnosti u animaciji pogotovo ukoliko se u animaciji nešto brzo giba, koristi se kako bi izbjegli preskakanje piksela prilikom iscrtavanja. Zadnji je Efekt defokusiranosti (engl. *depth of field efect*) također doprinosi prirodnosti slike i to na način da objekti ispred ili iza zadanog raspona gube na oštrini, odnosno nisu u fokusu. [1].



Slika 22: Prikaz efekta prelijevanja svjetlosti



Slika 23: Prikaz zamućenosti pri gibanju sa različitim postavkama

U prethodnom primjeru odrađena je vizualizacija zamućenosti pri gibanju, primjer je napravljen u alatu blender u kojem smo dodali kocke te ih animirali. Kako bi dobili efekt zamućenosti pri gibanju bilo je potrebno u postavkama za renderiranje uključiti opciju *Motion blur*. Kako bi se taj efekt što bolje vidio napravljene su tri vizualizacije koje se mogu vidjeti na slici 23. Prva u kojoj je zatvarač potpuno otvoren te se u njoj efekt zamućenosti pri gibanju gotovo ni ne vidi, druga u kojoj je na pola zatvoren te je u njoj efekt nešto vidljiviji te treća koja je potpuno zatvoren pa je samim time i efekt najvidljiviji.



Slika 24: Prikaz defokusiranosti u blenderu

Na slici 24. vidljiv je efekt defokusiranosti odnosno list je potpuno fokusiran dok je sve iza njega mutno. To je napravljeno uz pomoć dubine pogleda gdje se postavke na kameri koja se nalazi na u sceni mijenja udaljenost fokusiranja ili fokus na označeni objekt. Uz pomoć tih postavka namješteno je da se objekti koji se nalaze bliže kameri u ovom slučaju list prikazuju u fokusu a udaljeni objekti izvan fokusa.

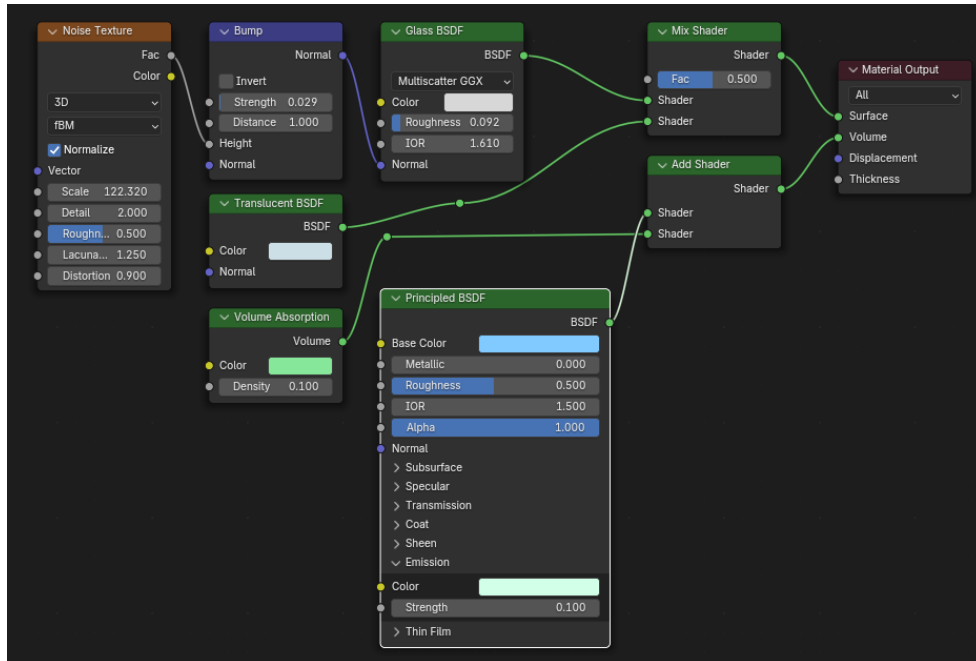
## 6.2. Zrcaljenje

Za razliku od preslikavanja okoline koje je pogodno za udaljene predmete zrcaljenje se koristi za predmete bliže ogledalu. Glavna ideja zrcaljenja je konstrukcija obrnute kopije čitave slike. Kako su te slike zapravo dvostruko kompleksnije odnosno imaju dvostruko više objekata automatski je i njihovo renderiranje dvostruko duže no često to možemo i zanemariti.



Slika 25: Prikaz zrcaljenja u blenderu

Na slici 25. odrađen je efekt zrcaljenja na način da se spomenik i drveće zrcali na vodi. To je napravljeno pomoću proceduralnih čvorova koji se mogu vidjeti na slici 26. na način da se tekstura vode napravi jako glatkom i doda neravnine pomoću kojih element dobiva teksturu vode. Na vodi smo mijenjali postavke hrapavosti površine i indeks refrakcije odnosno IOR. Pomoću tih postavki materijal vode postaje realan i ima teksturu i prozirnost prave vode. U refleksiji objekta mogu se vidjeti stabla, lišće i spomenik kako se reflektiraju na površini vode.

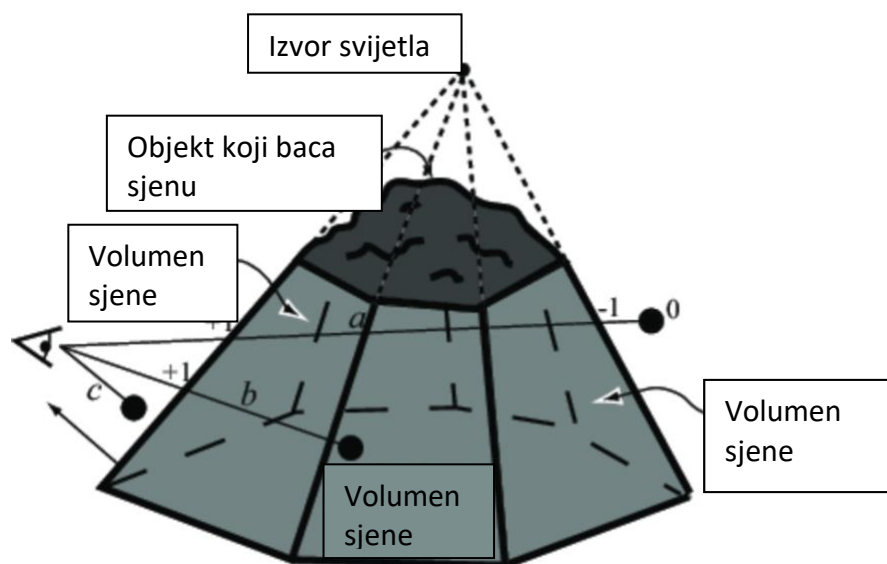


Slika 26: Prikaz čvorova potrebnih za izradu materijala vode



## 6.3 Sjene

Sijane se pojavljuju na mjestima gdje objekt zaklanja izvor svjetlosti u računalnoj grafici su u iznimnoj važnosti i razloga što doprinose osijecaju o položaju objekta u sceni iako su dosta komplicirane za izračun i crtanje čak i puno pojednostavljene mogu znatno poboljšati dojam cijele slike. Svaka sjena se dijeli na dva dijela na potpunu i polu sjenu. Puna sjena je onaj dio sjena u koji je potpuno zaklonjen nekim objektom, dok je polu sjena onaj dio kojem je djelomično zaklonjen objektom. Također bitno je spomenuti metodu prostora sjena koji se odnosi na prostor gdje svaki element u sceni baca sjenu što je moguće vidjeti na slici 27. Uz metodu prostora sjena bitno je spomenuti i metodu teksture sjene [1].



Slika 27: Prikaz metode prostora sjene

Metoda tekstura sjena (engl. *shadow map*) najčešće se koristi za simulaciju sjena, glavna ideja ove metode je odrediti ako je točka vidljiva iz trenutnog pogleda izvora svjetlosti. Ukoliko je točka vidljiva ona nije u sjeni, a ukoliko je ne vidimo ona se automatski nalazi u sjeni. Metoda tekstura sjena za razliku od metode prostora sjena ne zahtijeva stvaranje dodatne geometrije te samim time puno skalabilnija [1].

Osnovni algoritam za iscrtavanje sjena funkcioniše na način da se prvo iscrtava samo dubina slike, nakon toga iscrtava se scena iz pogleda kamere i to tako da se za svaku točku gleda ako je njena dubina veća od dubine iz prethodnog koraka. Ukoliko je tada je ta točka u sjeni te se na nju primjenjuje samo ambijentalno osvjetljenje. Ovaj algoritam posebno je pogodan za iscrtavanje scena kod kojih izvor svjetlosti simulira sunčevu svjetlost ili reflektore. Sjene na praktičnom primjeru mogu se vidjeti na slici 25. [1].



## 7. Optimizacija specijalnih efekata

Optimizacija CGI-a (Computer-Generated Imagery) ključna je za postizanje visokokvalitetne grafike uz istovremeno očuvanje performansi. Prvi korak u optimizaciji je smanjenje broja poligona, što se postiže tehnikama poput LOD-a (Level of Detail), gdje se kompleksnost modela smanjuje s udaljenošću od kamere. Korištenje normalnih mapa umjesto visoko rezolucijskih modela može značajno smanjiti potreban broj poligona dok zadržava vizualnu složenost. Kompresija tekstura o kojoj smo već ranije govorili još je jedan važan aspekt optimizacije. Korištenje minimapa također pomaže u optimizaciji, jer omogućava korištenje odgovarajuće razlučivosti tekstura ovisno o udaljenosti objekta. *Shaderi*, koji se koriste za simulaciju svjetla i sjena, mogu biti optimizirani kroz reduciranje kompleksnosti. Upravljanje osvjetljenjem putem *bakeanja* svjetla i sjena može smanjiti broj izračuna u realnom vremenu, poboljšavajući performanse. Konačno, optimizacija CGI-a uključuje i efikasno korištenje sustava čestica za prikazivanje složenih efekata poput vatre, dima i eksplozija, koristeći manje resurse. Implementacija ovih tehnika ključna je za postizanje uravnoteženog omjera između kvalitete slike i performansi, što rezultira boljim korisničkim iskustvom [1].

## 8. Zaključak

Ovim radom istražili su se složenost i značaj specijalnih efekata u računalnoj grafici, fokusirajući se na preslikavanje tekstura, napredne tehnike renderiranja, te post-processing efekte. Specijalni efekti postali su neizostavan dio moderne filmske industrije, igara i drugih oblika digitalne umjetnosti, omogućujući stvaranje realističnih i vizualno impresivnih scena koje su nekada bile nezamislive. Razvoj tehnologije omogućio je značajan napredak u kvaliteti i složenosti ovih efekata, od prvih primitivnih trikova s kamerom do današnjih visoko sofisticiranih CGI tehnologija. Tehnike poput preslikavanja tekstura, uzorkovanja i filtriranja, te sustavi čestica, omogućuju stvaranje realističnih materijala i površina, dok post-processing efekti dodaju završni sloj realizma simulirajući različite optičke efekte kao što su zamućenje pri kretanju, sjene i zrcaljenje. U kombinaciji, ove tehnologije omogućuju stvaranje složenih vizualnih efekata. Gledajući u budućnost, možemo očekivati daljnji napredak u ovom području, posebno s razvojem novih algoritama za renderiranje te povećanjem računalne snage. Umjetna inteligencija i strojno učenje također bi mogli igrati veliku ulogu, automatizirajući mnoge procese i omogućujući još realističnije i dinamičnije efekte.

## 9. Bibliografija

[1]Igor S. Pandžić, Tomislav Pejša, Krešimir Matković, Hrvoje Benko, Aleksandra Čerković, Maja Matijašević, Interaktivna 3D Grafika i njene primjene. Element, Zagreb, 2011

[2] StudioBlender. CGI vs VFX vs SFX — What's the Difference and Why It Matters. (6. svi 2024) . Pristupljeno: 14.07.2024. [Online Video]. Poveznica: <https://www.youtube.com/watch?v=Pok6EN3cfA4>

[3]The History of CGI in Movies, Stinky media. Preuzeto: 15.07.2024 sa: <https://www.stikkymedia.com/history-of-cgi-in-movies/>

[4]DIFFERENCE BETWEEN CGI AND 3D ANIMATION, Retro style games. Preuzeto : 15.07.2024 sa: <https://retrostylegames.com/blog/cgi-3d-animation-difference/>

[5]CGI vs 3D Animation: Is CGI the Same as 3D Animation?, 2mx247. Preuzeto: 15.07.2024 sa: <https://2mc247.com/2023/12/26/cgi-vs-3d-animation/>

[6]Computer-generated imagery, Wikipedija. Preuzeto: 15.07.2024 sa: [https://en.wikipedia.org/wiki/Computer-generated\\_imagery](https://en.wikipedia.org/wiki/Computer-generated_imagery)  
3D & CGI, motioneffects. Preuzeto: 15.07.2024 sa: <https://motioneffects.com/3d-cgi/>

[7]McLine Studios, Is CGI A 3D Rendering?. Medium, Apr 15, 2024

[8]Marek Eller, Special Effects in 3D Animations. TOPVisual, June 7, 2023

[9]Movies On the Move, The Different Visual and Special Effects Used in Films. Medium, Apr 20, 2023

## 10. Popis slika

Slika 1: Uvodna špica Vertigo filma ( <a href="https://youtu.be/GQwp6M2q1NE">https://youtu.be/GQwp6M2q1NE</a> ).....	7
Slika 2: Morfing ljudskog lica ( <a href="https://youtu.be/CCUZWSrwtgI">https://youtu.be/CCUZWSrwtgI</a> ).....	7
Slika 3: Cilindrična projekcija ( <a href="https://help.disguise.one/en/Content/3D-Workflow/Projection-Examples/Cylindrical-mapping.html">https://help.disguise.one/en/Content/3D-Workflow/Projection-Examples/Cylindrical-mapping.html</a> ) .....	9
Slika 4: Ortogonalna projekcija ( <a href="https://help.disguise.one/en/Content/3D-Workflow/Projection-Examples/Planar-mapping.html">https://help.disguise.one/en/Content/3D-Workflow/Projection-Examples/Planar-mapping.html</a> ) .....	10
Slika 5: Kuglasta projekcija ( <a href="https://learn.foundry.com/modo/content/help/pages/shading_lighting/shader_items/projection_type_samples.html">https://learn.foundry.com/modo/content/help/pages/shading_lighting/shader_items/projection_type_samples.html</a> ).....	10
Slika 6: Primjer multiteksturiranja .....	11
Slika 7: Primjer multiteksturiranja na koricama knjige .....	11
Slika 8: Proceduralni čvorovi potrebni za prethodni primjer .....	12
Slika 9: Prikaz razlike spekularne i difuzne refleksije ( <a href="https://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/reflection/specular/">https://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/scienceopticsu/reflection/specular/</a> ).....	14
Slika 10: Prikaz mape korištene za preslikavanje svjetlosti .....	16
Slika 11: Proceduralni čvorovi potrebni za preslikavanje svjetlosti .....	16
Slika 12: Kamenje napravljeno uz pomoć, mapa normala, mapa neravnina i mapa premještanja .....	18
Slika 13: Kameni spomenik napravljen pomoću multiteksturiranja i UV Mapiranja.....	18
Slika 14: Proceduralni čvorovi korišteni za kamene ploče .....	19
Slika 15: Proceduralni čvorovi korišteni za materijal spomenika .....	20
Slika 16: Prikaz magle u Blenderu .....	22
Slika 17: Prikaz čvorova dobivene magle .....	22
Slika 18: Pano poravnat sa zaslonom .....	23
Slika 19: Ograničenje korišteno za izradu panoa poravnatog sa zaslonom .....	24
Slika 20: Primjer sustava čestica koristeći sliku.....	25
Slika 21: Prikaz parametra za sustav čestica .....	26
Slika 22: Prikaz efekta prelijevanja svjetlosti .....	27
Slika 23: Prikaz zamućenosti pri gibanju sa različitim postavkama .....	28
Slika 24: Prikaz defokusiranosti u blenderu .....	28
Slika 25: Prikaz zrcaljenja u blenderu .....	29
Slika 26: Prikaz čvorova potrebnih za izradu materijala vode .....	30
Slika 27: Prikaz metode prostora sjene .....	31

## 11. Prilozi

<https://drive.google.com/file/d/1Qa6mtbH5VPFvi2vc0CeJ-1mdTWx4ylru/view?usp=sharing>  
<https://drive.google.com/file/d/1-5Uxz1-tL-ROrzvEGcNLJSWLMWj5oCo/view?usp=sharing>  
[https://drive.google.com/file/d/1aJgZkp\\_FQjFM0t86eXdRNShkgR\\_MSag/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1aJgZkp_FQjFM0t86eXdRNShkgR_MSag/view?usp=sharing)  
[https://drive.google.com/file/d/18sdUp-P4qb\\_lmrnapUiiGaljtHmHRG90/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/18sdUp-P4qb_lmrnapUiiGaljtHmHRG90/view?usp=sharing)  
<https://drive.google.com/file/d/1swTuRSbERSbpnUy-4v2fQyHk3pJPYWU3/view?usp=sharing>