

Tehnike unapređenja kvalitete grafičkog prikaza u 3D računalnim igrama

Bergovec, Vedran

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:539906>

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

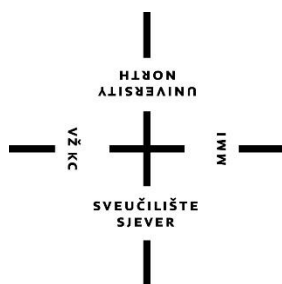
Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-02**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





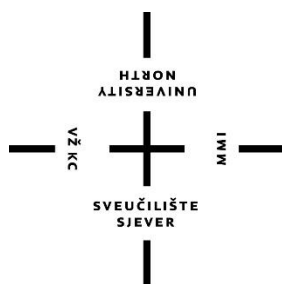
**Sveučilište
Sjever**

Završni rad br. 466/MM/2016

Tehnike unapređenja kvalitete grafičkog prikaza u 3D računalnim igrama

Vedran Bergovec, 3726/601

Varaždin, rujan 2016. godine



Sveučilište Sjever

Odjel za Multimediju, oblikovanje i primjenu

Završni rad br. 466/MM/2016

Tehnike unapređenja kvalitete grafičkog prikaza u 3D računalnim igrama

Student

Vedran Bergovec, matični broj

Mentor

pred, Andrija Bernik, dipl. inf.

Varaždin, rujan 2016. godine

Tehnike unapređenja kvalitete grafičkog prikaza u 3D računalnim igrama

Tehnike unapređenja kvalitete grafičkog prikaza u 3D računalnim igrama

Vedran Bergovec

Kategorizacija članka

Sažetak: Cilj ovog rada je prikazati potrebu prilagođavanja grafičkog prikaza modernih 3D igara u svrhu pronalaženja optimalnih postavki za zadovoljavajuću ravnotežu između kvalitete prikaza i brzine izvođenja. Objašnjeni su temeljni pojmovi vezani uz kvalitetu prikaza i brzinu izvođenja te parametre koji utječu na korisničko iskustvo. Objašnjen je način na koji funkcioniraju najčešće korištene varijabilne tehnologije unapređenja prikaza te je testiran njihov utjecaj na brzinu izvođenja. U ovom radu je za testiranje korišteno 11 igara različitih žanrova, godina izdavanja i računalnih zahtjeva da bi se dobio precizan brojčani prikaz utjecaja u širokom broju različitih situacija. Testiranje je izvršeno na nekoliko različitih načina, izračunavanjem broja slika u sekundi na najzahtjevnijim i najmanje zahtjevnim postavkama te je izračunat rast odnosno pad performansi kod uključenja i isključenja pojedinih naprednih tehnika unapređenja grafičkog prikaza. U ovom su radu također prikazane tehnologije koje bi u skoroj budućnosti mogle uvelike utjecati na industriju 3D igara.

Ključne riječi: brzina osvježavanja, fotorealizam, ambijentalna okluzija, difuzija, anizotropija, antialiasing, napredno osvjetljenje, vertikalna sinkronizacija

Categorization article

Abstract: The aim of this paper is to show the necessity of adjusting the graphical quality of modern 3D computer games with the purpose of finding the optimal settings for a satisfactory balance between display quality and speed of execution. This paper explains the core concepts associated with display quality and speed of execution as well as the parameter that affect the user experience. The methods behind common variable graphical enhancement techniques are as explained as well as the impact of said techniques on the speed of execution. The testing for this paper was done on 11 games belonging to various genre, release dates and hardware requirements with the goal of compiling a precise representation of the effect said techniques in a wide array of situations. Testing was conducted in a few different ways, observing the average frame rate with the most and least demanding settings as well as the difference between these figures with various techniques turned on and off. Techniques that may define the gaming industry in the near future are also shown in this paper

Key words: frame rate, photorealism, ambient occlusion, diffusion, anisotropy, antialiasing, advanced lighting, vertical synchronization

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za multimediju, oblikovanje i primjenu	
PRISTUPNIK	Vedran Bergovec	MATIČNI BROJ 3726/601
DATUM	14.02.2016.	KOLEGIJ 3D Modeliranje
NASLOV RADA	Tehnike unapređenja kvalitete grafičkog prikaza u 3D računalnim igrama	

MENTOR	Andrija Bernik, dipl. inf.	ZVANJE Predavač
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. mr.sc. Dragan Matković, v. predavač - predsjednik	
	2. pred. Robert Geček, dipl.ing. - član	
	3. pred. Andrija Bernik, dipl.inf. - mentor	
	4. doc.dr.sc. Dean Valdec - zamjenski član	
	5. _____	

Zadatak završnog rada

BROJ	466/MM/2016
OPIS	

Moderne 3D video igre zabilježile su impresivan pomak u kvaliteti prikaza 3D modela i pripadajućih tekstura u proteklih nekoliko godina. No igre razvijene za PC računala moraju omogućiti korisniku da sam odluči o ravnoteži između brzine izvođenja i grafičkom prikazu pojedine igre zbog vrlo širokog spektra računala koji korisnici koriste za igranje, od najosnovnijih prijenosnih i stolnih računala pa do vrhunskih igraćih i profesionalnih računala sa vrhunskim komponentama.

Cilj ovog rada je prikazati i opisati tehnike kojima studiji za razvoj igara omogućuju navedenu modularnost prikaza te njihov utjecaj na performanse. Cilj je također prikazati računalne komponente koje omogućuju spomenute tehnike te njihov budući napredak, procijeniti mogućnost i vremenski period u kojem će biti postignuta fotorealističnost prikaza te eventualne razlike u pristupu tim tehnikama od strane dva glavna grafička aplikacijska programska sučelja; Direct3D i OpenGL.

U radu je potrebno:

- opisati tehnike unapređenja kvalitete grafičkog prikaza u 3D računalnim igrama
- objasniti način rada navedenih tehnika
- usporediti načine izvođenja navedenih tehnika između OpenGL i Direct3D aplikacijskih programskih sučelja
- prikazati utjecaj navedenih tehnika na unapređenje grafičkog prikaza i njihov utjecaj na brzinu izvođenja pojedine igre

ZADATAK URUČEN 14.02.2016.

POTPIS MENTORA



Bernik

UNIVERSITY
NORTH

Sveučilište
Sjever

VZ KC



MMI

SVEUČILIŠTE
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU

I SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, *Vedran Bergovec* pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom *Tehnike unapređenja kvalitete grafičkog prikaza u 3D računalnim igrama* te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:

Vedran Bergovec

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, *Vedran Bergovec* neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom *Tehnike unapređenja kvalitete grafičkog prikaza u 3D računalnim igrama* čiji sam autor.

Student:

Vedran Bergovec

1. UVOD

(Introduction)

Moderni računalni sustavi gotovo su beskonačno varijabilni, kako sa vrlo velikim izborom komponenata njihovog sklopovlja, tako i velikim izborom računalnih programa i aplikacija. Zahvaljujući toj varijabilnosti osobna su računala postala univerzalno oruđe za vrlo širok spektar korisnika, od zahtjevnih profesionalaca do manje zahtjevnih korisnika kojima osobna računala nisu radno mjesto već izvor zabave, informacija i društvenih kontakata. Jedan od najpopularnijih izvora zabave na modernim računalima su razne vrste video igara koje su kod pojedinaca glavni razlog posjedovanja osobnog računala. S obzirom na veliku varijabilnost računala, nemoguće je osigurati jednake uvjete kod izvođenja igara stoga je nužno korisniku osigurati mogućnost izbora između brzine izvođenja i kvalitete grafičkog prikaza. Razvojni studiji koji razvijaju igre za računalne sustave specijalizirane za video igre, igrače konzole, nemaju navedenih problema jer su konzole generalno sastavljene od identičnih komponenata s jedinom varijabilnošću u količini prostora za pohranu podataka koji nemaju nikakav ili vrlo mali utjecaj na brzinu izvođenja.

2. BRZINA OSVJEŽAVANJA

(Refresh rate)

Glavni razlog mijenjanja računalnih postavki zbog optimiziranja programa sa određenim računalom je postizanje zadovoljavajuće brzine izvođenja. Brzina izvođenja igara mjeri se u broju slika koje nam u jednoj sekundi ekran prikaže. Kao što svaki piksel na ekranu zajedno sa svim ostalim pikselima daje sliku koju naše oko percipira kao cjelovitu na određenoj udaljenosti od ekrana, tako i svaka pojedina slika neke scene zajedno sa svim ostalim slikama prikazanim u određenom vremenu rezultira u percepciji pomaka na ekranu iskorištavajući fenomen tromosti oka. [1]

Brzinu osvježavanja (eng. frame rate), nije moguće precizno odrediti golim okom no računalnim programima, od kojih je najpoznatiji i onaj koji je korišten u ovom radu Fraps, vrlo je jednostavno u realnom vremenu prikazati trenutnu frekvenciju osvježavanja ekrana. Brzina osvježavanja slika na ekranu je različita od same brzine osvježavanja samog ekrana. Brzina osvježavanja ekrana je konstantna i nikada se ne mijenja; ukoliko ekran od grafičkog sustava ne dobije novu sliku, tada se osvježuje sa prošlom cjelovitom slikom. Npr. ako je brzina osvježavanja slike 30 FPS a brzina osvježavanja ekrana 60 Hz,

tada ekran svaku sliku dobivenu od grafičkog sustava prikazuje dva puta. [2]

Minimalna brzina osvježavanja je ona ispod koje ljudsko oko primjećuje da gleda seriju uzastopnih statičkih slika. Međutim, navedena granica nije jednaka kod svih ljudi. Generalno je prihvaćeno da se ta granica nalazi na 25 slika u sekundi ukoliko je brzina osvježavanja konstantna i bez padova u frekvenciji, no ona je svejedno subjektivna i može poslužiti kao početna točka određivanja optimalne frekvencije osvježavanja. [1]

3. BUDUĆNOST

(Future)

3.1. Fotorealizam

(Photorealism)

Usprkos impresivnoj snazi današnjih višezgrenih procesora i grafičkih podsustava, likovima koje srećemo u današnjim naprednim igrama fali ljudskosti. Ova pojava poznata je pod nazivom "sablasna dolina" (eng. Uncanny valley) koji je prvi put spomenuo profesor robotike Masahiro Mori u 1970. Njegova hipoteza temelji se na tome da se mali nepravilni detalji na humanooidnim robotima sve više uznemiravajući što su roboti sličniji ljudima. Isto pojava se javlja i u igrama; likovi izgledaju stvarno, no ne dovoljno stvarno i ljudima su odbojni. [3]

Mjesta u kojima je radnja igre smještena također se susreću sa istim problemom. Većina vrata je zatvorena i nedostupna i najsnažnija eksplozivna oružja nemaju nikakav utjecaj na okolne zgrade zbog vrlo visokih računalnih zahtjeva koje postavlja realno uništavanje zgrada. Umjesto izgradnje okružja poput 3D filmskih setova, okoline modernih igara izgrađene su od mnoštva simulacija fizičkih objekata koji reagiraju na postupke igrača, iako su i takvi objekti relativno rijetki i njihovo ponašanje je strogo kontrolirano. Takvu vrstu rušenja omogućili su fizički izračuni u realnom vremenu razvijeni od strane proizvođača grafičkih kartica i razvijaa grafičkih pokretača 3D igara. Industrija video igara ulazi u period iscrtavanja temeljenog na fizičkim izračunima gdje je simulirano ponašanje različitih materijala u svrhu stvaranja prirodnih objekata koji odgovarajuće reagiraju na postupke igrača. [3]

Pravilan prikaz kože također je vrlo bitan kada je realističan izgled jedan od ciljeva. Koža također zahtijeva komplicirane izračune zbog svoje interakcije sa svjetlom. Svjetlost ulazi u ljudsku kožu te se unutar nekoliko milimetara raspršuje i izlazi iz kože s crvenkastim obojenjem. Navedeni efekt očit je kada se ruka postavi između točke gledišta i intenzivnog izvora svjetla; ruka dobiva

crvenkasti obrub. Kosa je također jedan od problema, iscrtavanje tisuća pojedinačnih vlasi s ciljem da se postigne izgled različit od umjetne perike je nešto što su mnogi razvojni timovi pokušali postići. Ovakvi detalji mogu se činiti kao sporedne stvari, no nisu, posebice ako igre žele ispričati emocionalnu priču. Oči su također vrlo bitne i kompleksne za pravilno prikazati. Oči su po svojoj konstrukciji sustav leća što znači da se unutar očiju svjetlost lomi na velik broj načina. Pogled ljudi instinktivno gravitira prema očijma drugih što znači da im treba posvetiti posebnu pažnju iako zauzimaju relativno mali prostor na ekranu. [3]

3.2. Virtualna stvarnost (*Virtual reality*)

Cilj naočala za virtualnu stvarnost (eng. virtual reality headset) je stvaranje 3D virtualnog okruženja veličine koja odgovara onoj u stvarnosti bez granica koje postavljaju TV i računalni ekrani. U kojem god smjeru korisnik pogleda, ekran postavljan na lice prati pokrete i razliku je se od unaprijedene stvarnosti (eng. augmented reality) koja postavlja željenu grafiku na prikaz stvarnog svijeta. Informacije o slici se iz računala ili igrače konzole obično šalju putem HDMI kabla dok jednostavnije naočale koriste pametni telefon umetnut u svoje kućište. [4]



Slika 3.2. Oculus Rift VR naočale [3]

Naočale za virtualnu stvarnost šalju dva toka slikovnih informacija na ekrane koji odgovaraju poziciji svakog oka. Između oka i ekrana nalaze se leće koje su u nekim naočalama podesive i omogućuju postavljanje odgovarajućeg razmaka između leća ovisno o razmaku između očiju korisnika. Navedene leće fokusiraju i oblikuju 2D sliku za svako oko i stvaraju 3D stereoskopsku sliku u svrhu simuliranja načina na koji ljudske oči vide marginalno različite slike. Jedan od načina na koji VR naočale stvaraju imerziju je povećanje vidnog

kuta. Većina naočala s vrha ponude koriste kut od 100-110 stupnjeva koji je zadovoljavajuću u velikoj većini slučajeva. Da bi izgled slike bio uvjerljiv, minimalna brzina osvježavanja slike postavljena je na 60 slika u sekundi da bi se izbjeglo trzanje prikaza i izazivanje mučnine kod korisnika.

4. AMBIJENTALNA OKLUZIJA

(*Ambient occlusion*)

Grafička zajednica u posljednje vrijeme počinje cijeniti povećanje realizma koje rezultira primjenjivanjem osvjetljenja koje koristi kompleksno raspršivanje svjetla uz pomoć ambijentalnih karti umjesto korištenja malog broja izvora svjetlosti. Navedena tehnika naziva se ambijentalna okluzija (eng. ambient occlusion). Svjetlost na površine pada iz svih smjerova u stvarnom životu a ne iz malog broja točkastih ili usmjerenih izvora koji bi dramatično utjecali na izgled navedenih površina. U posljednje vrijeme je razvijena nekolicina tehnika čiji je cilj stvoriti osvjetljenje slično stvarnome te ga iskoristiti za iscrtavanje objekata koji izgledaju kao da su pod svjetlom iz svog prirodnog okruženja, što omogućuje neprimjetno stapanje iscrtanih objekata sa scenama iz stvarnog svijeta. Kod potpuno računalnih scena navedene se tehnike mogu koristiti u svrhu povećanja realizma dobivenih slika iscrtavanjem ambijentalnih karti cijele scene i njihovim korištenjem u svrhu osvjetljavanja likova i objekata u sceni. Umjesto korištenja karti samo za spekularnu refleksiju, navedene se tehnike koriste za izračunavanje osvjetljenja za sjajne i difuzne površine. [5]



Slika 4.2. Model osjenčan uz korištenje ambijentalne okluzije [5]

5. ANIZOTROPNO FILTRIRANJE

(Anisotropic filtering)

Anizotropno filtriranje (eng. anisotropic filtering) smanjuje razlučivost udaljenih tekstura. Teksture su datoteke koje u sebi sadrže informacije o površini objekata poput boje, transparencije, refleksivnosti te informacije o fizičkoj teksturi objekta te su s njim spojene i procesuirane od strane grafičkog podsustava u svrhu realističnog prikaza na ekranu. No teksture su na njihovim izvornim veličinama prezahtjevne za procesuiranje da bi se koristile na svim vidljivim objektima bez ikakvih pravila. Stoga je razvijena tehnika kojom se teksture bliske gledištu igrača prikazuju u izvornoj veličini a one udaljene u sve manjoj rezoluciji u svrhu uštede računalnih resursa. Za korištenje tehnike anizotropnog filtriranja izračunavaju se "mipmapi" (eng. mipmaps) odnosno kopije teksture iscertane u manjoj rezoluciji koju grafički programski sustav (eng. engine) poziva za upotrebu na određenim površinama i u određenim udaljenostima. Ova tehnika ne umanjuje kvalitetu grafičkog prikaza a istovremeno drastično smanjuje korištenje računalnih resursa. [7]

Temeljna metoda filtriranja je bilinearna i vrlo je jednostavna uz niske računalne zahtjeve: za izračunavanje krajnje boje nekog teksturnog piksela, grafički engine uzima 4 teksturna uzorka iz određene mipmapi na približnom položaju teksturnog piksela na ekranu te mu dodjeljuje prosječno obojenje odabrana 4 uzorka. Iako engine uzima u obzir kut teksturiranog objekta u odnosu na točku promatranja, bilinearne filtriranje uzima uzorak iz samo jedne mipmapi koju dodjeljuje engine što rezultira u smanjenoj jasnoći ukoliko se na određeni teksturni piksel (eng. texel) nalazi na granici između dvije različite mipmapi različite rezolucije. Trilinearne filtriranje izračunava prosječno obojenje texela koristeći uzorke iz dvije mipmapi bliske razlučivosti no kao i bilinearne metode nailazi na probleme kod texela koji se nalaze pod oštrim kutom u odnosu na točku promatranja zbog toga što su tada texeli razvučeni tj. dužina im je veća od širine ili obrnuto. [7]

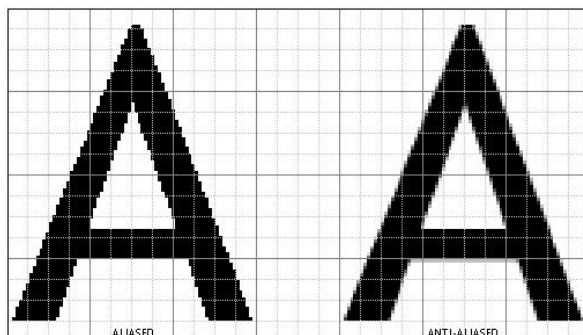
Za razliku od bilinearne i trilinearne metode, anizotropno filtriranje omogućuje znatno veću kvalitetu prikaza uz malo veće zahtjeve računalnih resursa. Anizotropija je po definiciji svojstvo teksturnih piksela zbog kojeg imaju različit iznos širine ili visine koje se javlja u svakom slučaju kada tekstura nije pod pravim kutom u odnosu na kameru. Kao što je ranije spomenuto, kod bilinearne i trilinearne filtriranja pojavljuju se

problemi kod kosih površina jer se kod njihovog korištenja pretpostavlja da je površina pod pravim kutom na točku gledišta što se rijetko događa. Također, mipmapi su izotropne tj. istih dimenzija visine i širine te problemi nastaju kod trapezoidnih oblika texela. Anizotropno filtriranje skalira visinu odnosno širinu mipmapi u odnosu na vrijednost koja označava perspektivne distorzije teksture. Odnos je ovisan o maksimalnoj dopuštenoj vrijednosti. Anizotropno filtriranje funkcionira na razinama od 1 (bez skaliranja) i 16 koje opisuju do koje se mjere mipmapi može skalirati. Korisniku su u pravilu ponuđene vrijednosti potencije proja 2; 2x, 4x, 8x, 16x. Razlika između odabranih postavki odnosi se na maksimalni kut po kojem će filter izračunati određenu teksturu. Npr. četverostruki filter prikazuje odgovarajuće teksture na površinama koje su pod dvostruko oštrijim kutom u odnosu na kameru dok će teksture u rasponu u kojem je odgovarajuće 2x filtriranje ostati nepromijenjene. Što višu razinu anizotropnog filtriranja koristimo, sve je upitnije koliko je isplativo koristiti ga s obzirom da se s povećanjem kuta teksture smanjuje broj susreta s maksimalnim kutom prikazivanja. [7]

6. IZGLAĐIVANJE RUBOVA

(Antialiasing)

Izgladivanje rubova (eng. antialiasing) je tehnika iscertavanja čija je svrha smanjenje pojave aliasinga, vizualne greške koja izgleda poput stepenica na pojedinim rubovima objekta unutar 3D scene koji nisu iscertanim pod pravim kutom na ekranu. Aliasing je posljedica jedne od temeljnih operacija modernih 3D sustava, rasterizacije. Rasterizacija je proces pretvaranja slike koja posjeduje praktično beskonačnu količinu detalja u oblik koji se iscertava na mreži piksela određene razlučivosti (računalnom monitoru). Aliasing je neželjeni rezultat navedenog procesa zbog toga što grafički engine iscertava piksele kroz koje prolazi rub objekta samo u slučaju da objekt zauzima više od 50% površine piksela što rezultira u zupčastom izgledu rubova za koje ljudsko oko očekuje da su glatke linije. [8]



Slika 6.1. Prikaz utjecaja metode izgladivanja rubova na piksel grafiku [8]

Kao kod anizotropnog filtriranja, postoji više metoda izgladivanja rubova, svaka sa svojim prednostima i nedostacima. Najpopularnije metode su **superuzorkovanje** (eng. supersampling) i **multiuzorkovanje** (eng. multisampling) s tim da je cilj obje metode jednak: prikazivanje posredne boje za određeni piksel temeljno na izračunavanju susjednih pod-piksela (virtualnih piksela čije vrijednosti grafički sustav izračunava ali ne prikazuje direktno na ekranu) s ciljem realističnijeg prikaza rubova objekta. Razlika između navedenih metoda nalazi se u načinu na koji one izračunavaju krajnje obojenje piksela. [8]

Manje popularne metode zaglađivanja rubova:

CSAA (NVidia) i EQAA (AMD): tehnike izgladivanja rubova slične multiuzorkovanju no s drastično manjim zahtjevima

FXAA: brzo približno izgladivanje rubova (eng. fast approximate antialiasing) zaglađuje rubove na svim objektima prisutnim u sceni uz niske zahtjeve no uz negativnu stranu zamućivanja slike

TXAA: vremensko zaglađivanje rubova (eng. temporal antialiasing) radi na nekolicini suvremenih grafičkih kartica, postiže bolje rezultate od FXAA, djelomično zamućuje sliku te koristi nešto više računalnih resursa [9]

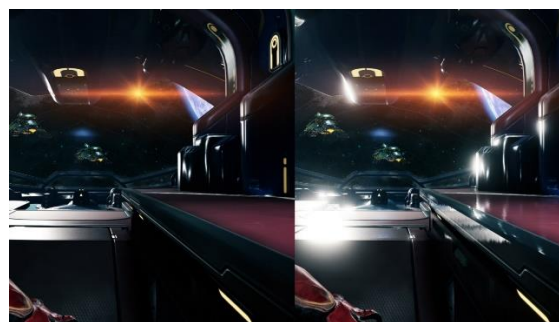
7. NAPREDNO OSVJETLJENJE

(Advanced lighting)

Sljedovi specijalnih efekata se u filmovima iscrtavaju koristeći snažna računala koja satima iscrtavaju svjetlo simulirajući umjetne zrake svjetlosti da mi ispravno osvjetlile svaki kadar filma. No to nije moguće u video igrama zbog stalne promjene kutova kamere i nepredvidivih pokreta igrača. Video igre moraju svjetlo iscrtavati u

realnom vremenu te se koriste trikovima da bi pojednostavile navedeni proces. U početku su određena područja bila obojana svjetlije. Uskoro su se pojavila nepomična svjetla s pravim usmjerenim svjetlom u svrhu iscrtavanja sjena. Efekti poput umjetnih refleksija i odsjaju leća pojavili su se nakon toga. [10]

Sve kompleksniji i kompleksniji sustavi osvjetljenja postavljali su se jedan na drugi da bi se stvarale što realnije scene. No uz pomoć posljednje generacije računalnih sustava, moguće je prikazati svjetlost uz pomoć fizičkih modela temeljenih na načinu na koji se svjetlo ponaša u stvarnom svijetu.



Slika 7.1. Usporedni prikaz scene sa i bez korištenja naprednog osvjetljenja

7.1. Bloom

(Bloom)

Intenzivni izvori svjetla i intenzivno osvjetljena područja scene često je vrlo teško dočarati s obzirom na ograničeni intenzitet svjetla koji računalni monitori mogu postići. Jedan od načina razlikovanja intenzivnih izvora na monitoru je da im se dodaje vizualno sijanje, odnosno njihovo svjetlo osvjetljuje neposredan prostor oko izvora. To u praksi gledateljima daje do znanja da je izvor koji trenutno promatraju intenzivan, odnosno određena područja su bolje osvjetljena od ostalih. [12]

Bloom daje primjetne vizualne znakove u vezi osvjetljenja objekata i kada se koristi u odgovarajućoj količini (mnoge igre drastično pretjeruju s korištenjem efekta) značajno može upotpuniti scenu i igri dodaje dodatnu dramatičnu dimenziju. Bloom najbolje funkcionira u kombinaciji s HDR iscrtavanjem. Česta se pogrešno predpostavlja da su HDR i bloom jedan te isti efekt zbog toga što mnogi naizmjenično koriste ova dva pojma. Jedan i drugi efekt mogu se koristiti posebno, no najbolji vizualni rezultati se postižu kada se koriste u kombinaciji. Za implementaciju bloom efekta potrebno je iscrtavati scenu te izolirati HDR

obojenje scene i sliku scene gdje su vidljivi samo osvijetljeni dijelovi. Dobivena se slika potom zamućuje (eng. *blur*) i postavlja na uobičajenu sliku scene. [14]

8. VERTIKALNA SINKRONIZACIJA

(Vertical synchronisation)

Vertikalna sinkronizacija (eng. vertical synchronisation) je opcija u grafičkim postavkama igara koja smanjuje broj slika iscrtanih u sekundi na broj pojedinačnih osvježavanja prikaza na ekranu u sekundi. Npr. ako imamo monitor od 60Hz, vertikalna sinkronizacija prilagođava broj iscrtanih slika u sekundi na 60. Navedena mogućnost grafičkog sustava postala je nužna u danima velikih CRT monitora koji su se osvježavali na način da bi uz pomoć magnetskog polja utjecali na smjer snopa elektrona unutar samog ekrana u pravilnim intervalima da bi iscrtali željenu sliku.

V-Sync se koristi kada su na ekranu primjetne grafičke distorzije uzrokovane pomicanjem u igri tijekom dijelova kada se prikaz na ekranu brzo mijenja, najčešće kod akcijskih sekvenci, ili kod gledanja filmova na računalu. Kada grafički sustav izračunava slike brže nego se one mogu prikazati, dodatne slike završe na ekranu iscrtane povrh prijašnje i rezultiraju u neobičnim grafičkim distorzijama koje rezultiraju neravnim linijama unutar igara te objekti često izgledaju "prerezano". Zajednički naziv za navedene greške je lomljenje lomljenje zaslona (eng. screen tearing) i omogućavanje vertikalne sinkronizacije ih u potpunosti uklanja na način da sprječava slanje preračunatih slika u grafičku memoriju prije nego je monitor spreman za iscrtavanje čime se osigurava gladak tok igre. [11]

9. TESTIRANJE I REZULTATI

(Testing and results)

9.1 Konfiguracija

(Configuration)

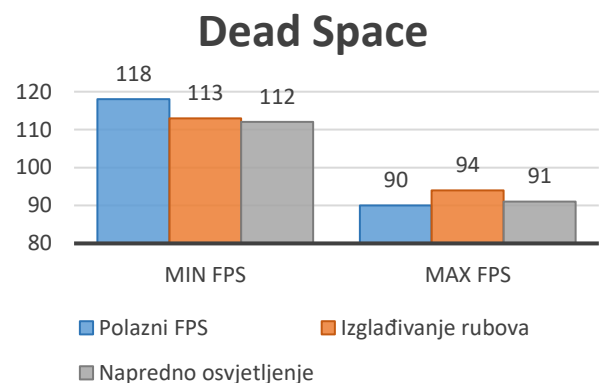
- Intel Pentium G620
- 8 GB RAM
- Windows 10 x64
- NVIDIA GeForce GTX 650

Testiranje je izvedeno na nekoliko različitih načina. **MIN FPS** označava prosječni broj slika u sekundi postignutih na minimalnim postavkama igre na temeljnoj rezoluciji ekrana od 1920x1080 sa minimalnom razlučivošću tekstura i isključenim svim ostalim tehnikama poboljšanja prikaza s ciljem određivanja količine usporavanja brzine izvođenja kada se određena napredna tehnika uključi te ukoliko je moguće, da se uključi u najvećoj mogućoj mjeri (npr. anizotropno filtriranje x16). **MAX FPS** je prosječan broj slika u sekundi koje igra postiže na rezoluciji 1920x1080 sa maksimalnom razlučivošću tekstura te uključenim svim mogućim tehnikama poboljšanja grafičkog prikaza. Određena tehnika tada se u potpunosti isključuje ili smanjuje na najmanju moguću razinu da bi se dobila razina uštede računalnih resursa te time i ubrzanje izvođenja igre.

Svi testovi odrađeni su kroz dio igre sa sličnom ili jednakom količinom akcije na ekranu, broju modela na ekranu i slično, generalno kroz jednu razinu igre, da bi se dobili usporedivi rezultati i da bi se dobila točna razina utjecaja.

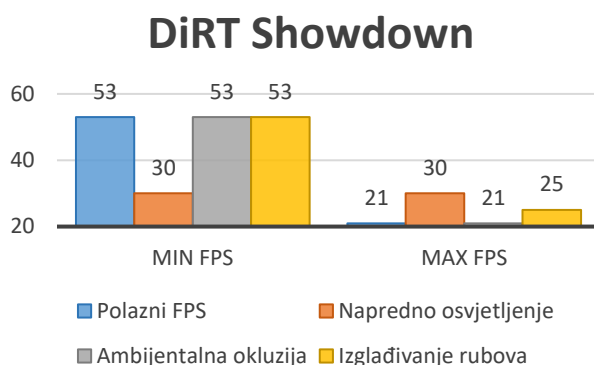
9.2. Igre

(Games)



Tablica 9.3. Osnovne informacije o igri Dead Space

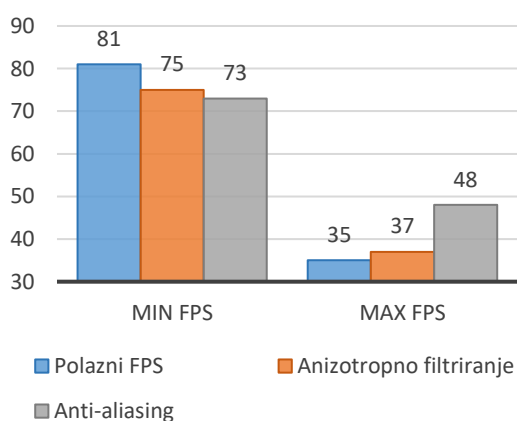
Naziv	Dead Space
Žanr	FPS
Razvojni studio	EA Redwood Shores Studio
Izdavač	EA
Datum izdavanja	14.10.2008.
Platforme	Xbox 360, PS3, PC
Grafički pokretač	The Godfather engine - vlastiti



Tablica 9.4. Osnovne informacije o igri *DiRT Showdown*

Naziv	DiRT Showdown
Žanr	Auto utrke
Razvojni studio	Codemasters
Izdavač	Codemasters
Datum izdavanja	23.4.2012.
Platforme	Xbox 360, PS3, PC
Grafički pokretač	EGO Engine

The Elder Scrolls V: Skyrim

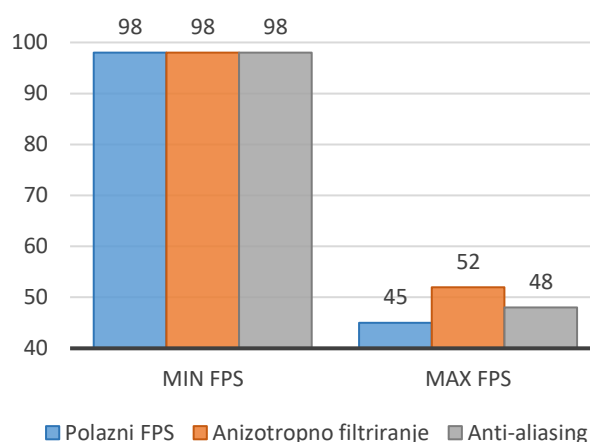


Tablica 9.5. Osnovne informacije o igri *The Elder Scrolls V: Skyrim*

Naziv	The Elder Scrolls V: Skyrim
-------	-----------------------------

Žanr	RPG
Razvojni studio	Behtesda Game Studios
Izdavač	Bethesda Softworks
Datum izdavanja	11.11.2011.
Platforme	Xbox 360, PS3, PC
Grafički pokretač	Creation Engine

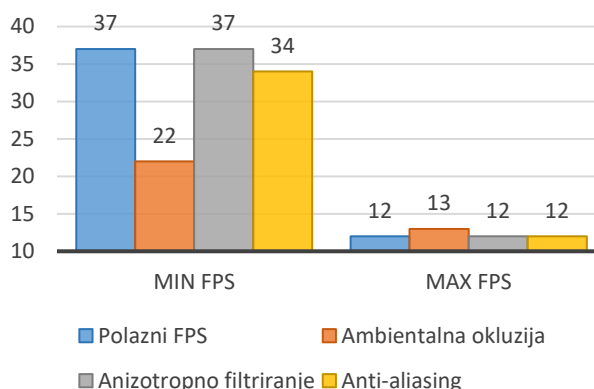
Left 4 Dead 2



Tablica 9.6. Osnovne informacije o igri *Left 4 Dead 2*

Naziv	Left 4 Dead 2
Žanr	FPS
Razvojni studio	Valve
Izdavač	Valve
Datum izdavanja	17.11.2009.
Platforme	Xbox 360, Mac, PC, Linux
Grafički pokretač	Source engine

Middle-Earth: Shadow of Mordor



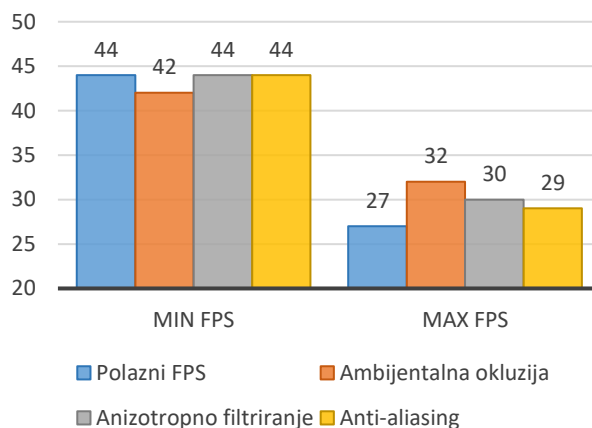
Tablica 9.7. Osnovne informacije o igri *Middle-Earth: Shadow of Mordor*

Naziv	Middle-Earth: Shadow of Mordor
Žanr	RPG
Razvojni studio	Monolith Productions
Izdavač	Warner Bros. Interactive
Datum izdavanja	30.9.2014.
Platforme	Xbox 360, XBox One, PS3, PS4, PC
Grafički pokretač	LithTech

Tablica 9.8. Osnovne informacije o igri *Path of Exile*

Naziv	Path of Exile
Žanr	Akcijski RPG
Razvojni studio	Grinding Gear Games
Izdavač	Grinding Gear Games
Datum izdavanja	23.1.2013. (otvorena beta)
Platforme	PC
Grafički pokretač	Samostalno razvijeni

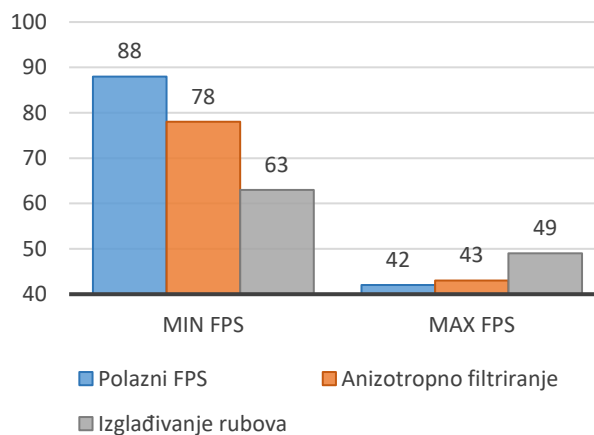
Shadow Warrior



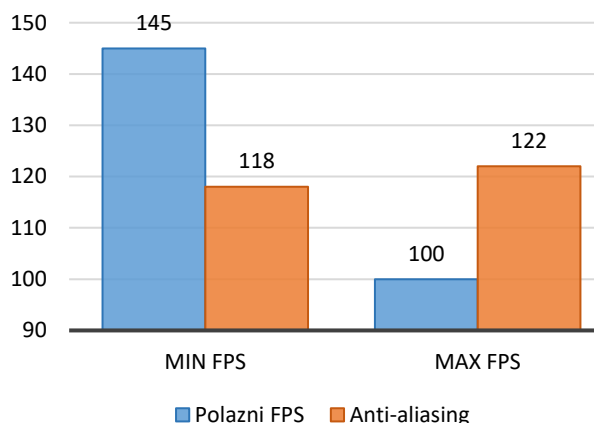
Tablica 9.9. Osnovne informacije o igri *Shadow Warrior*

Naziv	Shadow Warrior
Žanr	FPS
Razvojni studio	Flying Wild Hog
Izdavač	Devolver Digital
Datum izdavanja	26.9.2013.
Platforme	PC, XBox One, PS4
Grafički pokretač	RoadHog Engine

Path of Exile



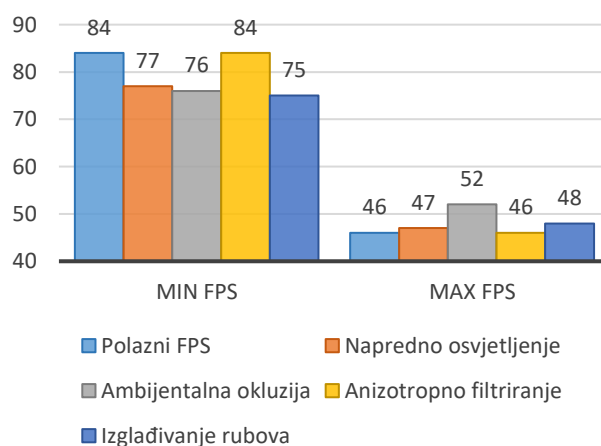
Civilization IV



Tablica 9.10. Osnovne informacije o igri Sid Meier's Civilization IV

Naziv	Sid Meier's Civilization IV
Žanr	Strategija na poteze
Razvojni studio	Firaxis
Izdavač	2K Games
Datum izdavanja	24.10.2005.
Platforme	PC, Mac, Cell
Grafički pokretač	Gamebryo Engine

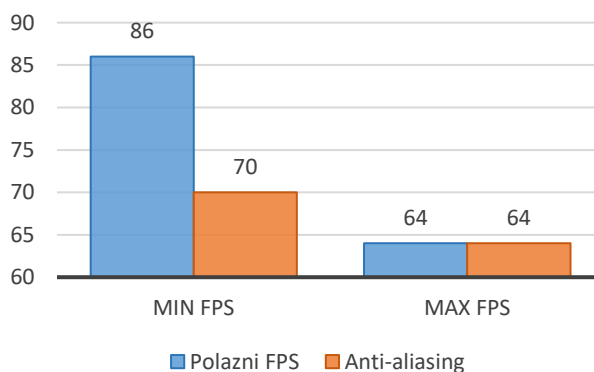
Warframe



Tablica 9.12. Osnovne informacije o igri Warframe

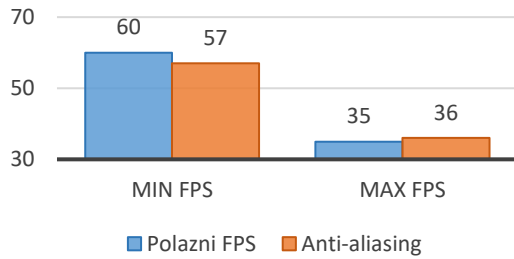
Naziv	Warframe
Žanr	MMOFPS
Razvojni studio	Digital Extremes
Izdavač	Digital Extremes
Datum izdavanja	25.4.2013.
Platforme	PC, XBox One, PS4
Grafički pokretač	Evolution Engine

Tom Clancy's Rainbow Six: Vegas 2



Tablica 9.11. Osnovne informacije o igri Tom Clancy's Rainbow Six: Vegas 2

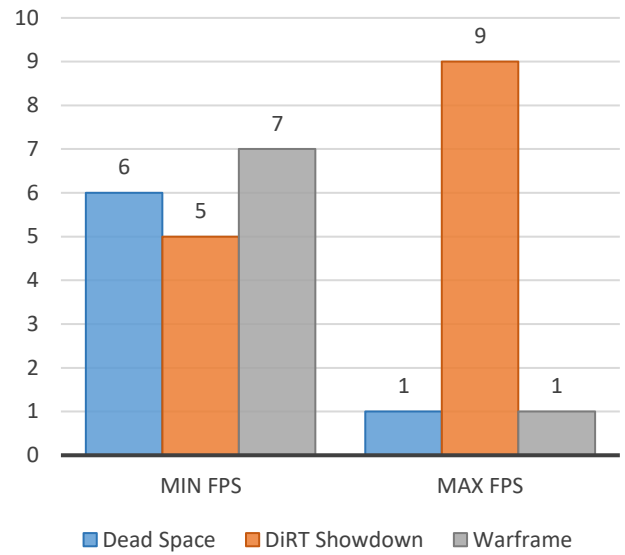
Warhammer 40,000: Dawn of War 2 - Retribution



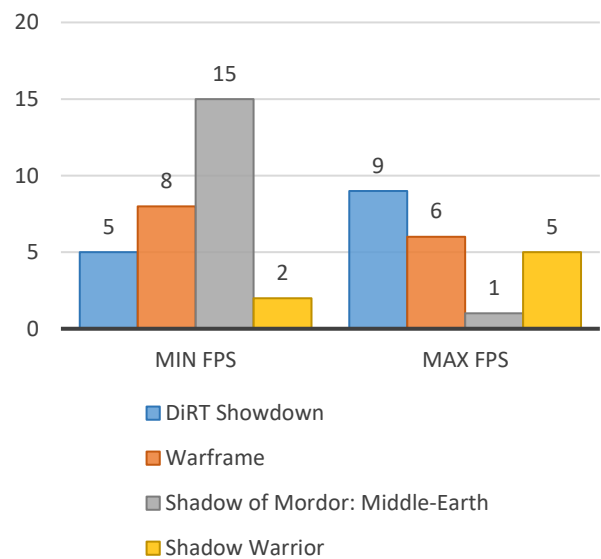
Tablica 9.13. Osnovne informacije o igri
Warhammer 40,000: Dawn of War 2 -
Retribution

Naziv	Warhammer 40,000: Dawn of War 2 - Retribution
Žanr	RTS
Razvojni studio	Relic
Izdavač	THQ
Datum izdavanja	1.4.2011.
Platforme	PC
Grafički pokretač	Essence Engine

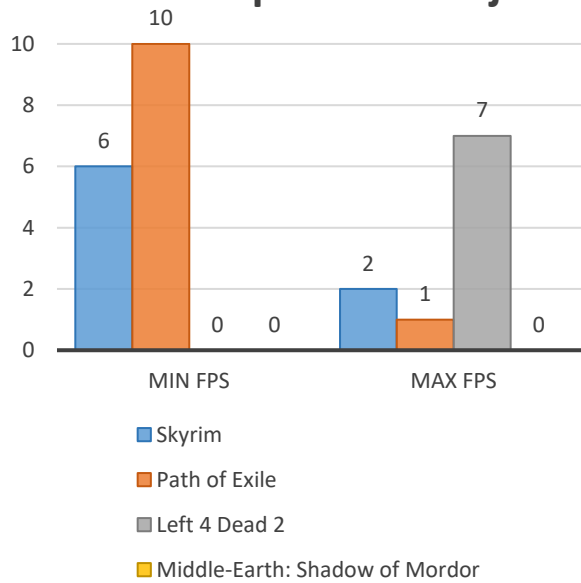
Napredno osvjetljenje



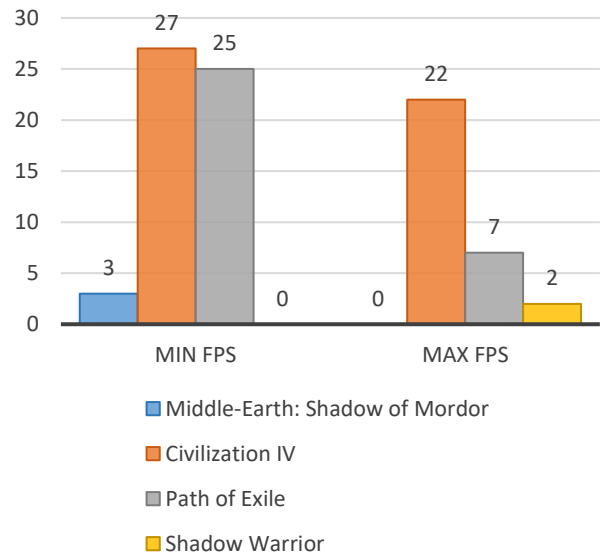
Ambijentalna okluzija



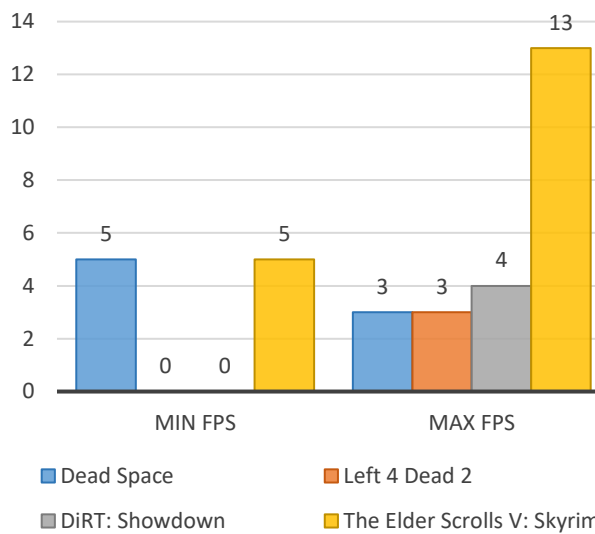
Anizotropno filtriranje



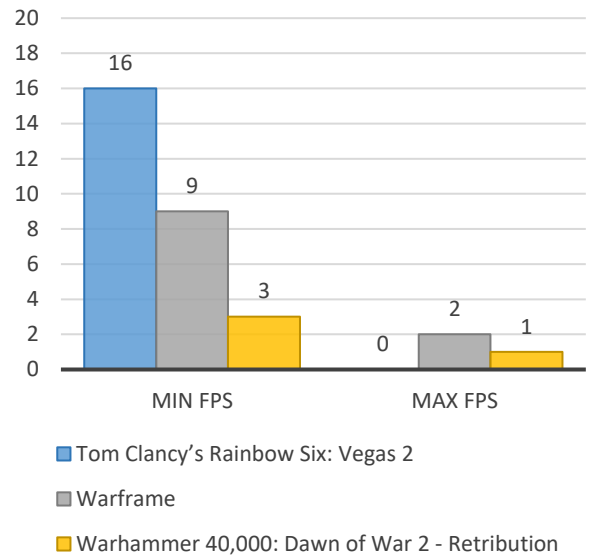
Izgladivanje rubova 2



Izgladivanje rubova 1



Izgladivanje rubova 3

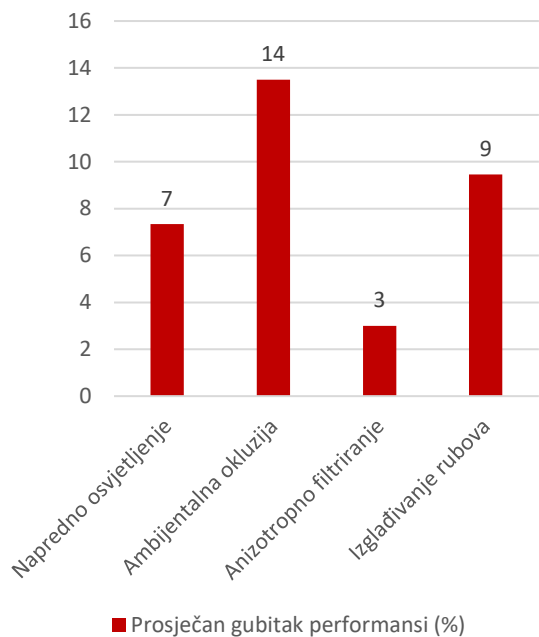


10. ANALIZA REZULTATA

(Result analysis)

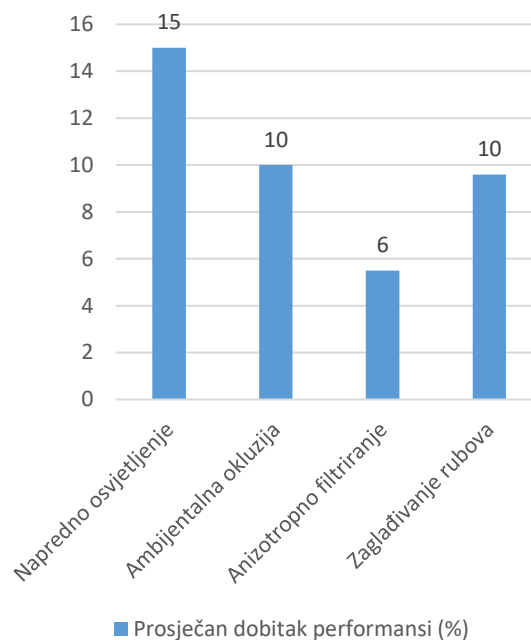
Prosječna razlika u brzini izvođenja između maksimalnih i minimalnih postavki unapređenja prikaza iznosi **58%**, što na testnom računalu iznosi **52 FPS**. Na svakom drugom računalu točan broj slika u sekundi varirati će ovisno o performansama računala, kod slabijih računala razlika će biti manja dok će kod snažnijih računala razlika biti proporcionalno veća. Bitno je naglasiti da se kod ovog testiranja nije mijenjala izlazna razlučivost slike, no mijenjala se razlučivost tekstura kod većine igara.

10.1. Gubici povećanjem zahtjeva (Losses resulting in requirement increase)



Analizom prosječnih gubitaka vidljivo je da najveći utjecaj na testnom setu igara ima podešavanje opcije ambijentalne okluzije. No ovaj rezultat ne govori dovoljno s obzirom da neke igre ne podržavaju mogućnost postavljanja ambijentalne okluzije. Također, ambijentalna okluzija ima velik utjecaj na igru Middle-Earth: Shadow of Mordor, čak 40%, što je mnogo više nego kod ostalih testiranih igara zbog toga što navedena igra u svom prostoru iscrtava vrlo veliki broj kompleksnih objekata na kojim iscrtava kompleksne sjene. Najveći i najkonzistentniji učinak kod većine ima zaglađivanje rubova, sve igre podržavaju ovu opciju i njegovo uključivanje u prosjeku usporava izvođenje za 9-10%

10.1. Dobitci smanjenjem zahtjeva (Gains resulting in requirement reduction)



Sličan slučaj kao i kod prijašnjeg grafa događa se i kod izračunavanja prosječnog ubrzanja kod isključivanja pojedinih opcija. Napredno osvijetljenje u prosjeku povećava brzinu za 15%, no najveći utjecaj na navedeni broj ima DiRT: Showdown u čijim se scenama nalazi iznadprosječno velik broj izvora svjetla čiji se prikaz unapređuje uključivanjem ove opcije. Najkonzistentnije rezultate ponovo postiže opcija zaglađivanja rubova koja u prosjeku ubrzava izvođenje za 10%

11. ZAKLJUČAK

(Conclusion)

Temeljna ideja iza ovog rada bila je na temeljit način pristupiti testiranju opcija koje razvojni studiji svojim krajnjim korisnicima omogućuju prilagođavanje igraćeg iskustva računalima koje posjeduju. Cilj svakog razvojnog studija je uvijek pružiti zamišljeno iskustvo što većem broju korisnika stoga je bitno da ih u tom cilju što manje sputavaju računalne performanse korisnika.

Raspon koji pojedini razvojni studio omogućuje svojim korisnicima testiran je kroz 11 različitih igara da bi se rezultati dobiveni u ovom

testiranju mogu pouzdano očekivati i na svim drugim igrama koje podržavaju navedenu varijabilnost prikaza. Posebna pažnja kod testiranja pridodana je igranju u identičnim uvjetima s što je moguće sličnijim brojem objekata na ekranu, istim prostorima, brojem izvora svjetla i sl. u svrhu dobivanja konzistentnih i ponovljivih rezultata.

Neovisno o odabranoj opciji, mala je vjerojatnost da će bilo koja od njih od neigrive igre stvoriti kvalitetno igraće iskustvo, no uz pomoć ovih tehnika moguće je stvoriti ugodno iskustvo ukoliko igra radi na brzini od oko 25-30 FPS na način da dobivenih nekoliko FPS učini nagle padove u brzini izvođenja spomenute na početku ovog rada gotovo neprimjetnima.

12. LITERATURA

(Literature)

- [1] Koroush Ghazi (travanj 2010.): The Gamer's Graphics & Display Settings Guide, dostupno na: www.tweakguides.com/Graphics_5.html
- [2] Fraps (veljača 2013.): Fraps, real time capture & benchmarking, dostupno na: www.fraps.com
- [3] Keith Stuart (veljača 2015.): Photorealism – the future of video game visuals, dostupno na: www.theguardian.com/technology/2015/feb/12/future-of-video-gaming-visuals-nvidia-rendering
- [4] Sophie Charara (lipanj 2016.): Explained: How does VR actually work?, dostupno na www.wareable.com/vr/how-does-vr-work-explained
- [5] Matt Pharr, Simon Green (rujan 2007.): Ambient Occlusion, dostupno na: http://developer.nvidia.com/GPUGems/gpugems_ch17.html
- [6] The Physics Classroom: Specular vs. Diffuse Reflection, dostupno na: www.physicsclassroom.com/class/refln/Lesson-1/Specular-vs-Diffuse-Reflection
- [7] GeForce: Anisotropic Filtering, dostupno na: www.geforce.com/whats-new/guides/aa-af-guide#1
- [8] GeForce: Anti-aliasing, dostupno na: www.geforce.com/whats-new/guides/aa-af-guide#1
- [9] Whitson Gordon (siječanj 2014.): How Anti-Aliasing Smooths Out Your Games, and Which Type to Use, dostupno na: <http://lifelhacker.com/how-anti-aliasing-smooths-out-your-games-and-which-typ-1640944916>
- [10] Kevin Ohannessian (siječanj 2015.): Video game lighting effects bring games to life, dostpuno na: <http://iq.intel.com/bringing-games-life-with-light/>
- [11] Alex Wawro (lipanj 2011.): Geek 101: What is V-Sync?, dostupno na: www.pcworld.com/article/229024/computers/geek101-vsnc.html
- [12] Learn OpenGL: Bloom, dostupno na: <http://learnopengl.com/#!Advanced-Lighting/Bloom>

Sažetak

Cilj ovog rada je prikazati potrebu prilagođavanja grafičkog prikaza modernih 3D igara u svrhu pronalaženja optimalnih postavki za zadovoljavajuću ravnotežu između kvalitete prikaza i brzine izvođenja. Objasneni su temeljni pojmovi vezani uz kvalitetu prikaza i brzinu izvođenja te parametre koji utječu na korisničko iskustvo. Objasnen je način na koji funkcioniraju najčešće korištene varijabilne tehnologije unapređenja prikaza te je testiran njihov utjecaj na brzinu izvođenja. U ovom radu je za testiranje korišteno 10 igara različitih žanrova, godina izdavanja i računalnih zahtjeva da bi se dobio precizan brojčani prikaz utjecaja u širokom broju različitih situacija. Testiranje je izvršeno na nekoliko različitih načina, izračunavanjem broja slika u sekundi na najzahtjevnijim i najmanje zahtjevnim postavkama te je izračunat rast odnosno pad performansi kod uključanja i isključenja pojedinih naprednih tehnika unapređenja grafičkog prikaza. U ovom su radu također prikazane tehnologije koje bi u skorij budućnosti mogle uvelike utjecati na industriju 3D igara.

Najjednostavniji i najefikasniji način ubrzavanja izvođenja igara je smanjenje broja piksela koje grafički podsustav računala mora izračunati. Iako je ovaj način najefikasniji, sa sobom povlači drastično smanjenje grafičkog prikaza te čak može izazvati neželjene grafičke pogreške i nemogućnost bilo kakvog prikaza slike na ekranu. Napredne tehnike ne mijenjaju grafički prikaz na drastičan način, no mogu uvelike povećati igrače zadovoljstvo. U ovom radu prikazana je korelacija brzine izvođenja o parametrima poput broja objekata na ekranu, veličine prostora te čak i cijeni pojedinih igara sa svrhom razjašnjenja pojmova vezanih uz ovaj sve češći oblik rasonode.

Ključne riječi: *brzina osvježavanja, fotorealizam, ambijentalna okluzija, difuzija, anizotropija, antialiasing, napredno osvjetljenje, vertikalna sinkronizacija*

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Brzina osvježavanja	3
2.1.	Varijabilnosti frekvencije osvježavanja	3
2.2.	Razlika između računala i TV uređaja	4
3.	Budućnost	5
3.1.	Fotorealizam.....	5
3.2.	Virtualna stvarnost	7
4.	Ambijentalna okluzija.....	9
4.1.	Spekularna i difuzna refleksija.....	11
5.	Anizotropno filtriranje	12
6.	Izgladivanje rubova.....	14
7.	Napredno osvjetljenje	16
7.1.	Bloom	17
8.	Vertikalna sinkronizacija	19
9.	Testiranje i rezultati	21
9.1.	Konfiguracija.....	21
9.2.	Igre	24
10.	Analiza rezultata	38
10.1.	Gubici povećanjem zahtjeva.....	38
10.2.	Dobitci smanjenjem zahtjeva.....	39
11.	Zaključak.....	40
12.	Literatura.....	41
13.	Popis slika	42
14.	Popis tablica	44

1. Uvod

Pojava računala drastično je promijenila sliku svijeta, tehnološki i društveni napredak te smanjila svijet na dosad neviđen način. Rani računalni sustavi bili su usko specijalizirani te se koristili unutar zatvorenih organizacija i nisu bila u mogućnosti raditi ništa izvan svojih usko specijaliziranih, većinom vojnih, znanstvenih i financijskih zadaća.

Moderni računalni sustavi gotovo su beskonačno varijabilni, kako sa vrlo velikim izborom komponenata njihovog sklopovlja, tako i velikim izborom računalnih programa i aplikacija. Zahvaljujući toj varijabilnosti osobna su računala postala univerzalno oruđe za vrlo širok spektar korisnika, od zahtjevnih profesionalaca do manje zahtjevnih korisnika kojima osobna računala nisu radno mjesto već izvor zabave, informacija i društvenih kontakata. Jedan od najpopularnijih izvora zabave na modernim računalima su razne vrste video igara koje su kod pojedinaca glavni razlog posjedovanja osobnog računala. S obzirom na veliku varijabilnost računala, nemoguće je osigurati jednake uvjete kod izvođenja igara stoga je nužno korisniku osigurati mogućnost izbora između brzine izvođenja i kvalitete grafičkog prikaza. Razvojni studiji koji razvijaju igre za računalne sustave specijalizirane za video igre, igrače konzole, nemaju navedenih problema jer su konzole generalno sastavljene od identičnih komponenata s jedinom varijabilnošću u količini prostora za pohranu podataka koji nemaju nikakav ili vrlo mali utjecaj na brzinu izvođenja.

Najjednostavniji način za smanjenje grafičke kvalitete i povećanje brzine izvođenja je smanjenje razlučivosti ekrana. Svaki računalni ekran ima tvornički određenu razlučivost koja odgovara broju fizičkih piksela njegove matrice. Ukoliko je igra koja se izvodi na računalu prezahtjevna da bi se na ekranu odvijala na njegovoj tvorničkoj razlučivosti u zadovoljavajućem broju slika u sekundi, moguće je smanjiti razlučivost slike koju grafički sustav računala šalje na ekran za prikaz. U tom slučaju ekran prikazuje sliku rezolucije jednaku tvorničkoj, jer nije u mogućnosti prikazati bilo koju drugu razlučivost, no tada više piksela prikazuje s istim obojenjem u odnosu na piksele koje bi prikazao ukoliko bi razlučivost dobivene slike bila jednaka razlučivosti ekrana. Rezultat tog smanjenja razlučivosti je smanjenje detalja na slici. Npr. ukoliko je razlučivost nekog ekrana 1920x1080 (2,073,600 pojedinačnih piksela) a razlučivost slike koju grafički sustav šalje na ekran iznosi 1280x720 (921,600) tada ekran koristi 2.25 fizička piksela da bi prikazao jedan piksel iz grafičkog sustava. Očito je da ovo nije idealno rješenje zbog toga što se time ne dobiva cijeli broj pa se pikseli dobiveni iz grafičkog sustava moraju na neki način skalirati što može rezultirati

razvlačenjem slike i drugim optičkim anomalijama, iako moderni sustavi sve rjeđe imaju navedenih problem.

Druga jednostavna tehnika povećavanja brzine izvođenja igre uz zadržavanje razlučivosti na razini fizičke razlučivosti ekrana je korištenje tekstura modela niže rezolucije. Navedena tehnika ne stvara nikakve pogreške kod prikaza osim samog smanjenja detalja na modelima. Navedeno smanjenje postiže se na dva načina. Stvaranje više jednakih tekstura u različitim rezolucijama kod razvoja igre te povlačenja odgovarajućih tekstura kod njenog izvođenja i dinamičkog smanjenja razlučivosti kod izvođenja, ovisno o odabranoj kvaliteti tekstura. Navedene jednostavne tehnike vrlo dobro funkcioniraju kod povećanja brzine no mogu rezultirati u drastičnom padu vizualnog dojma igre.

Ovaj rad fokusiran je na kompleksne tehnike oslobađanja računalnih resursa, poglavito naprednih tehnika prostornog osvjetljenja, ambijentalne okluzije odnosno realističnog prikaza sjena, anizotropnog filtriranja koje dinamički određuje razlučivosti udaljenih tekstura te anti-aliasing, tehnike koja eliminira pojavu nazubljenih rubova objekata na ekranu.

2. Brzina osvježavanja

Glavni razlog mijenjanja računalnih postavki zbog optimiziranja programa sa određenim računalom je postizanje zadovoljavajuće brzine izvođenja. Brzina izvođenja igara mjeri se u broju slika koje nam u jednoj sekundi ekran prikaže. Kao što svaki piksel na ekranu zajedno sa svim ostalim pikselima daje sliku koju naše oko percipira kao cjelovitu na određenoj udaljenosti od ekrana, tako i svaka pojedina slika neke scene zajedno sa svim ostalim slikama prikazanim u određenom vremenu rezultira u percepciji pomaka na ekranu iskorištavajući fenomen tromosti oka. [1]

Brzinu osvježavanja (eng. frame rate), nije moguće precizno odrediti golim okom no računalnim programima, od kojih je najpoznatiji i onaj koji je korišten u ovom radu Fraps, vrlo je jednostavno u realnom vremenu prikazati trenutačnu frekvenciju osvježavanja ekrana. Brzina osvježavanja slika na ekranu je različita od same brzine osvježavanja samog ekrana. Brzina osvježavanja ekrana je konstantna i nikada se ne mijenja; ukoliko ekran od grafičkog sustava ne dobije novu sliku, tada se osvježuje sa prošlom cjelovitom slikom. Npr. ako je brzina osvježavanja slike 30 FPS a brzina osvježavanja ekrana 60 Hz, tada ekran svaku sliku dobivenu od grafičkog sustava prikazuje dva puta. [2]

Minimalna brzina osvježavanja je ona ispod koje ljudsko oko primjećuje da gleda seriju uzastopnih statičkih slika. Međutim, navedena granica nije jednaka kod svih ljudi. Generalno je prihvaćeno da se ta granica nalazi na 25 slika u sekundi ukoliko je brzina osvježavanja konstantna i bez padova u frekvenciji, no ona je svejedno subjektivna i može poslužiti kao početna točka određivanja optimalne frekvencije osvježavanja. [1]

2.1. Varijabilnosti frekvencije osvježavanja

Ukoliko frekvencija redovito pada ispod određene razine, tj. nije konstantna, posebice ako pada ispod 20 slika u sekundi, sa sigurnošću je moguće reći da brzina osvježavanja nije dovoljna za ugodno iskustvo. Kod većine igračih konzola, frekvencija osvježavanje ne prelazi maksimum od 30 slika u sekundi što može zvučati kao relativno malo, no uzme li se u obzir da je i minimalna frekvencija također oko 30 slika u sekundi, igrače konzole većinom nemaju problema s održavanjem iluzije pokreta. S druge strane, igre na osobnom računalu rijetko kada imaju mogućnost zaključavanja frekvencije osvježavanja. Kod igara kod kojih se akcija na ekranu vrlo brzo odvija, posebice brzih pucačina iz prvog lica poput *Team Fortress 2* ili *Counter-Strike*, generalno je pravilo da brzina osvježavanja ne smije pasti ispod 40 slika u sekundi jer se često u takvim igrama događa da su promjene između pojedinih slika toliko

velike da se gubi iluzija glatkih pokreta na nižim frekvencijama osvježavanja. S druge strane, sporije igre poput raznih strategija u realnom vremenu mogu izgledati zadovoljavajuće i s manjom frekvencijom. Kontrolni zaostatak (eng. control lag) je period između unosa neke naredbe do prikaza posljedice navedenog unosa na ekranu. Za razliku od filmova ili televizije, događaji na ekranu su u potpunosti pod kontrolom igrača što znači da što je niža brzina osvježavanja, toliko je niža razina kontrole igrača što može rezultirati u nezadovoljavajućim brzinama osvježavanja. Većina ljudi ovaj nedostatak svjesno primjećuje kod frekvencije od 15 slika u sekundi i manje, bez obzira da li događaje na ekranu percipiraju kao pomičnu sliku. [1]

2.2. Razlika između računala i TV uređaja

Iako su razine od 24, 25, 30 slika u sekundi često navedene kao razine iznad kojih ljudsko oko ne vidi nikakvu razliku, one često nisu dovoljne kod igranja. Navedene granice se često koriste zbog toga što se one nalaze i dobro funkcioniraju na televizijskim ekranima, no postoji nekoliko vrlo bitnih razlika između televizora i računala zbog kojih one nisu idealne za igranje. Filmovi i televizijski program koriste zamućenje kod brzih pokreta za pojačavanje iluzije neprekidnosti pokreta. Kada zaustavimo bilo koji film ili televizijski program, očito je da objekti na sceni koji su u pokretu nemaju detaljno prikazane rubove. S druge strane, kada zaustavimo igru, vidimo da su svi rubovi objekata jednako oštri bez obzira na brzinu njihovog pokreta. [1]



Slika 2.1. Usporedba zaustavljene slike iz filma Alien vs. Predator i igre Alien vs. Predator 2 [1]

Televizijski program i filmovi uvijek sliku prikazuju na određenoj frekvenciji, bez obzira na sve, dok kod igara neke scene zahtijevaju više procesorskih resursa što rezultira u varijabilnoj brzini osvježavanja slike. Primjerice, igra *Crysis* na određenom računalnom

sustavu postiže 60 slika u sekundi u scenama koje se odvijaju u unutrašnjosti neke zgrade dok promjenom scene, odnosno izlaskom iz zatvorenog prostora u vanjski svijet frekvencija prikaza pada na 25 slika u sekundi. Ovaj pad frekvencije je svima očit djelomično zbog promjene u kontroli, tj. kontrolnom zaostatku a djelomično zbog drastične promjene u frekvenciji na koju je oko promatrača naviklo. [1]

3. Budućnost

3.1. Fotorealizam

Usprkos impresivnoj snazi današnjih višejezgrenih procesora i grafičkih podsustava, likovima koje srećemo u današnjim naprednim igrama fali ljudskosti. Ova pojava poznata je pod nazivom “sablasna dolina” (eng. Uncanny valley) koji je prvi put spomenuo profesor robotike Masahiro Mori u 1970. Njegova hipoteza temelji se na tome da se mali nepravilni detalji na humanoidnim robotima sve više uznemiravajući što su roboti sličniji ljudima. Isto pojava se javlja i u igrama; likovi izgledaju stvarno, no ne dovoljno stvarno i ljudima su odbojni. [3]

Mjesta u kojima je radnja igre smještena također se susreću sa istim problemom. Većina vrata je zatvorena i nedostupna i najsnažnija eksplozivna oružja nemaju nikakav utjecaj na okolne zgrade zbog vrlo visokih računalnih zahtjeva koje postavlja realno uništavanje zgrada. Umjesto izgradnje okružja poput 3D filmskih setova, okoline modernih igara izgrađene su od mnoštva simulacija fizičkih objekata koji reagiraju na postupke igrača, iako su i takvi objekti relativno rijetki i njihovo ponašanje je strogo kontrolirano. Takvu vrsta rušenja omogućili su fizički izračuni u realnom vremenu razvijeni od strane proizvođača grafičkih kartica i razvijачa grafičkih pokretača 3D igara. Industrija video igara ulazi u period iscertavanja temeljenog na fizičkim izračunima gdje je simulirano ponašanje različitih materijala u svrhu stvaranja prirodnih objekata koji odgovarajuće reagiraju na postupke igrača. [3]

Sljedeći ključni dio realističnih okružja je osvjetljenje. Svjetlost i sjene su se dugi niz godina pojedinačno ucrtavale u prostore igara koje je u moderno doba razvoja igara zamijenjeno izvorima svjetlosti temeljenih na fizičkim izračunima koji simuliraju interakciju svjetla s objektima na sceni. Likovi bacaju sjene pri prolasku ispod uličnih svjetiljki, svjetlost baklji odbija se od metalnih mačeva i slično. Globalna iluminacija (eng. global illumination) je temelj realističnog osvjetljenja koji je sveprisutan u animiranim filmovima zbog toga što se takva vrsta medija unaprijed iscertavaju. Igre se trebaju iscertavati u realnom vremenu i moderni

računalni sustavi omogućuju iscrtavanje globalnog svjetla u vremenu pogodnom za ugodno iskustvo igranja. [3]

Pravilan prikaz kože također je vrlo bitan kada je realističan izgled jedan od ciljeva. Koža također zahtijeva komplicirane izračune zbog svoje interakcije sa svjetlom. Svjetlost ulazi u ljudsku kožu te se unutar nekoliko milimetara raspršuje i izlazi iz kože s crvenkastim obojenjem. Navedeni efekt očit je kada se ruka postavi između točke gledišta i intenzivnog izvora svjetla; ruka dobiva crvenkasti obrub. Kosa je također jedan od problema, iscrtavanje tisuća pojedinačnih vlasi s ciljem da se postigne izgled različit od umjetne perike je nešto što su mnogi razvojni timovi pokušali postići. Ovakvi detalji mogu se činiti kao sporedne stvari, no nisu, posebice ako igre žele ispričati emocionalnu priču. Oči su također vrlo bitne i kompleksne za pravilno prikazati. Oči su po svojoj konstrukciji sustav leća što znači da se unutar očiju svjetlost lomi na velik broj načina. Pogled ljudi instinktivno gravitira prema očijma drugih što znači da im treba posvetit posebnu pažnju iako zauzimaju relativno mali prostor na ekranu. [3]



Slika 3.1. Glavni lik igre Watch Dogs [2]

3.2. Virtualna stvarnost

Cilj naočala za virtualnu stvarnost (eng. virtual reality headset) je stvaranje 3D virtualnog okruženja veličine koja odgovara onoj u stvarnosti bez granica koje postavljaju TV i računalni ekrani. U kojem god smjeru korisnik pogleda, ekran postavljan na lice prati pokrete i razliku je se od unaprijeđene stvarnosti (eng. augmented reality) koja postavlja željenu grafiku na prikaz stvarnog svijeta. Informacije o slici se iz računala ili igrače konzole obično šalju putem HDMI kabla dok jednostavnije naočale koriste pametni telefon umetnut u svoje kućište. [4]



Slika 3.2. Oculus Rift VR naočale [3]

Naočale za virtualnu stvarnost šalju dva toka slikovnih informacija na ekrane koji odgovaraju poziciji svakog oka. Između oka i ekrana nalaze se leće koje su u nekim naočalama podesive i omogućuju postavljanje odgovarajućeg razmaka između leća ovisno o razmaku između očiju korisnika. Navedene leće fokusiraju i oblikuju 2D sliku za svako oko i stvaraju 3D stereoskopsku sliku u svrhu simuliranja načina na koji ljudske oči vide marginalno različite slike. Jedan od načina na koji VR naočale stvaraju imerziju je povećanje vidnog kuta. Većina naočala s vrha ponude koriste kut od 100-110 stupnjeva koji je zadovoljavajuću u velikoj većini slučajeva. Da bi izgled slike bio uvjerljiv, minimalna brzina osvježavanja slike postavljena je na 60 slika u sekundi da bi se izbjeglo trzanje prikaza i izazivanje mučnine kod korisnika.

Moderne VR naočale u mogućnosti su prikazati i više slika u sekundi - Oculus Rift prikazuje 90 FPS, PlayStation VR 120 FPS. [4]

Uz pomoć žiroskopa, akcelerometra i magnetometra, VR naočale mogu precizno pratiti pokrete glave korisnika i na taj način pružiti vidno polje od 360 stupnjeva. Brzina prijenosa podataka o pomaku glave mora biti manje od 50 milisekundi da bi korisničko iskustvo bilo zadovoljavajuće, odnosno bez zastajkivanja. Moderni VR sustavi također koriste neku vrstu praćenje pokreta tijela, bilo kroz dodatke na samim naočalama koji koriste infra crvenu tehnologiju za praćenje ili pomoću odvojenih ulaznih uređaja koje korisnik drži u rukama i kontrolira akcije unutar igre. Najnaprednija vrsta senzora koja još nije dio nijednog VR sustava je praćenje pokreta očiju. Praćenje očiju planira se postići korištenjem infracrvenog senzorskog sustava unutar naočala s primarnom svrhom uvjerljivog prikaza dubinskog polja. Na trenutačno dostupnim sustavima virtualne stvarnosti svi objekti unutar neke scene prikazani su potpuno oštro što je različito od naše percepcije svijeta gdje oštro vidimo samo objekt koji gledamo dok je pozadina i sve što se nalazi ispred promatranog objekta zamućeno. [4]

4. Ambijentalna okluzija

Grafička zajednica u posljednje vrijeme počinje cijeniti povećanje realizma koje rezultira primjenjivanjem osvjetljenja koje koristi kompleksno raspršivanje svjetla uz pomoć ambijentalnih karti umjesto korištenja malog broja izvora svjetlosti. Navedena tehnika naziva se ambijentalna okluzija (eng. ambient occlusion). Svjetlost na površine pada iz svih smjerova u stvarnom životu a ne iz malog broja točkastih ili usmjerenih izvora koji bi dramatično utjecali na izgled navedenih površina. U posljednje vrijeme je razvijena nekolicina tehnika čiji je cilj stvoriti osvjetljenje slično stvarnome te ga iskoristiti za iscrtavanje objekata koji izgledaju kao da su pod svjetlom iz svog prirodnog okruženja, što omogućuje neprimjetno stapanje iscrtanih objekata sa scenama iz stvarnog svijeta. Kod potpuno računalnih scena navedene se tehnike mogu koristiti u svrhu povećanja realizma dobivenih slika iscrtavanjem ambijentalnih karti cijele scene i njihovim korištenjem u svrhu osvjetljavanja likova i objekata u sceni. Umjesto korištenja karti samo za spekularnu refleksiju, navedene se tehnike koriste za izračunavanje osvjetljenja za sjajne i difuzne površine. [5]

Temeljni algoritam za izračunavanje ambijentalne okluzije:

```
Za svaki trokut {
  Izračunaj sredinu trokuta
  Generiraj skupinu vektora u polutki sredine trokuta
  Vektor avgNepokriven = Vektor(0, 0, 0);
  int numNepokriven = 0;
  Za svaki vektor {
    If (vektor se ne sudara s ničim) {
      avgNepokriven += vektor.smjer;
      ++numNepokriven;
    }
  }
  avgnepokriven = normalize(avgNepokriven);
  dostupnost = numNepokriven / numVektor;
}
```

Ambijentalna okluzija je tehnika kojom se određuje koji dijelovi scene, objekta ili lika u sceni su više ili manje izloženi ambijentalnom osvjetljenju. Ambijentalna okluzija iscrtava tamne dijelove te osvjetljene dijelove ostavlja nepromijenjenima. Cilj ove tehnike je podrška prikaza količine ambijentalnog svjetla na difuznim površinama na efikasan način. Navedeni izračuni se dobivaju prije iscrtavanja scene. Uz pomoć dobivenih izračuna određuju se osjenčani dijelovi modela što rezultira u realističnom zatamnjenju te realističnim sjenama dok dijelovi modela koji su u potpunosti osvjetljeni izgledaju višestruko svjetliji. [5]

Navedeni pristup može koristiti ambijentalno svjetlo kao izvor. Uz ambijentalno svjetlo koristi se karta okoline koja predstavlja ambijentalnu svjetlost i boju svjetla na svim dijelovima objekta. Da bi se navedena tehnika efikasno koristila potrebno je osim određivanja zaklonjenih dijelova objekta odrediti i smjer vidljivog svjetla. U sljedećem primjer je navedena metoda primijenjena na kompleksnom modelu postavljenom na površinu bez pripadajuće teksture da bi se rezultat ambijentalne okluzije što bolje vidio. Teksturiranje modela u kombinaciji s ambijentalnom okluzijom vrlo je jednostavno.



Slika 4.1. Model osjenčan bez korištenja ambijentalne okluzije [4]

Model se sastoji od 150.000 trokuta te se za izračunavanje vrijednosti i smjera nepokrivenih površina koristi 512 svjetlosnih zraka. Na prvoj slici vidi se primjer sjenčanja jednostavnim metodama s jednim točkastim izvorom svjetla bez sjena. Također su vidljivi i klasični problemi nerealističnog prikaza karakteristični za računalnu grafiku i nedostatak kompleksnosti sjenčanja što se posebice vidi na donjoj strani i nogama modeliranog stvorenja koje su previše osvijetljene. [5]

Sljedeća slika prikazuje model osjenčan ambijentalnom okluzijom. Pukotine u koži i dijelovi trbuha su tamniji od leđa stvorenja koja su gotovo potpuno osvijetljena. Oštre tranzicije između svijetlih i tamnih dijelova koji su rezultat nagle promjene smjera površine modela u odnosu na izvor svjetlosti su izglađene što rezultira realističnijim izgledom. Također, ispod modela nalazi se blaga sjena na ravnoj površini scene.

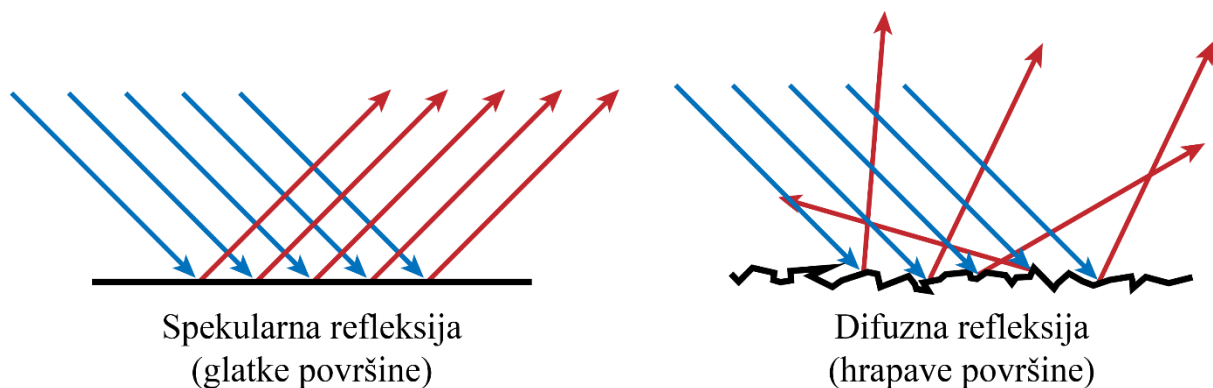


Slika 4.2. Model osjenčan uz korištenje ambijentalne okluzije [5]

Sjena ispod modela pomaže kod percepcije modela kao uzemljenog i prikazuje da se nalazi na površini a ne lebdi iznad površine. Ova vrste sjenčanja ne zahtijeva kompleksan računalni grafički sustav već se može postići na relativnom starom hardveru i na velikom broju grafičkih arhitektura [5]

4.1. Spekularna i difuzna refleksija

Refleksije svjetla od savršeno ravnih površina poput ogledala, mirne vode i sl. naziva se spekularna refleksija dok neravne površine, na molekularnoj razini, odbijaju svjetlost u svim smjerovima što se naziva difuzna refleksija. Razlike u molekularnoj glatkoći površine imaju vrlo velik utjecaj na refleksiju pojedine zrake svjetlosti što je ilustrirano u sljedećem dijagramu:



Slika 4.3. Pojednostavnjen prikaz različitih vrsta refleksije

Svjetlost se sastoji od snopova pojedinačnih zraka svjetlosti koje putuju paralelno jedna uz drugu. Svaka pojedinačna zraka snopa svjetlosti slijedi zakon refleksije. Ukoliko zraka udari u savršeno glatku površinu tada svaka zraka nastavlja putovati paralelno s ostalima dok se u

susretu s mikroskopski neravnim površinama snop svjetlosti dijeli i svaka zraka putuje u različitom smjeru. [6]

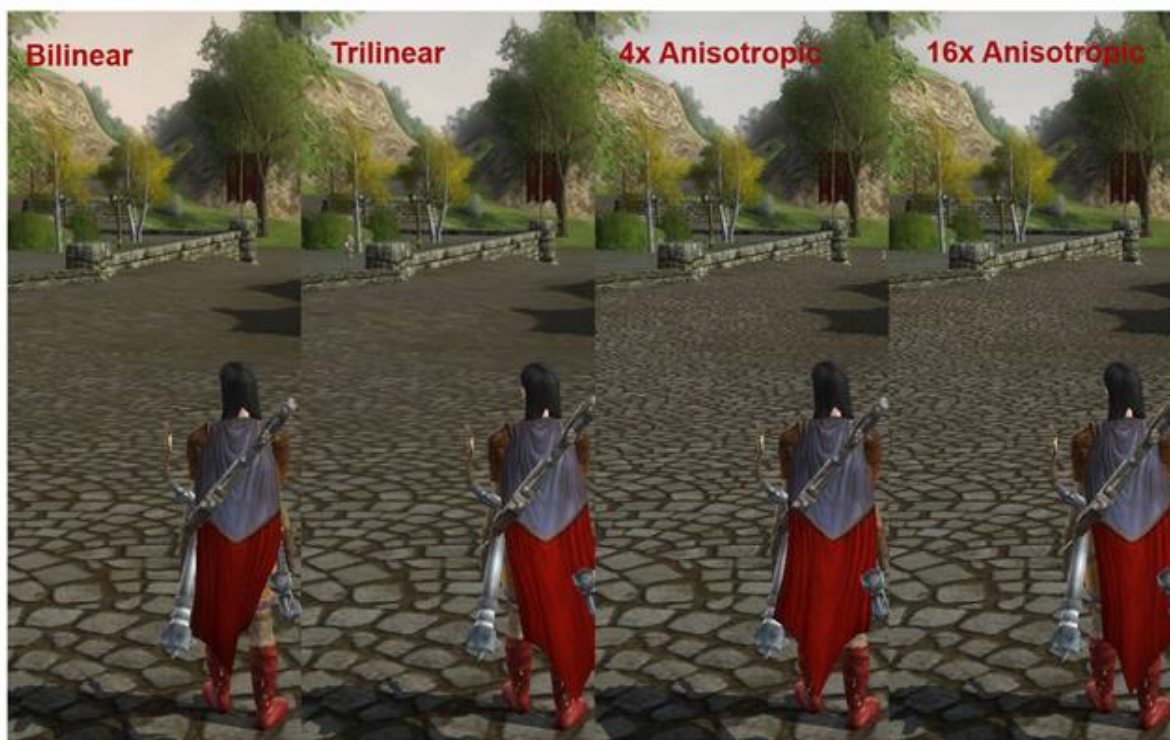
Postoji vrlo velik broj primjera različitih refleksija u praksi no jedan od najpoznatijih, posebice vozačima, je slučaj kada je cesta mokra. Efekt je vrlo vidljiv noću kada cesta odbija svjetla nadolazećih automobila u oči vozača. U normalnim uvjetima, tj. kada je cesta suha, površina asfalta je vrlo neravna što rezultira difuznom refleksijom svjetla automobila, no voda popunjuje mikroskopske neravnine ceste te je pretvara u vrlo glatku površinu i tada se svjetlo reflektira spekularno kao na ogledalu te koncentrirana zraka svjetlosti pada u oči vozača u jednom snopu. [6]

5. Anizotropno filtriranje

Anizotropno filtriranje (eng. anisotropic filtering) smanjuje razlučivost udaljenih tekstura. Teksture su datoteke koje u sebi sadrže informacije o površini objekata poput boje, transparentije, refleksivnosti te informacije o fizičkoj teksturi objekta te su s njim spojene i procesuirane od strane grafičkog podsustava u svrhu realističnog prikaza na ekranu. No teksture su na njihovim izvornim veličinama prezahtjevne za procesuiranje da bi se koristile na svim vidljivim objektima bez ikakvih pravila. Stoga je razvijena tehnika kojom se teksture bliske gledištu igrača prikazuju u izvornoj veličini a one udaljene u sve manjoj rezoluciji u svrhu uštede računalnih resursa. Za korištenje tehnike anizotropnog filtriranja izračunavaju se "mipmape" (eng. mipmaps) odnosno kopije teksture iscrtane u manjoj rezoluciji koju grafički programski sustav (eng. engine) poziva za upotrebu na određenim površinama i u određenim udaljenostima. Ova tehnika ne umanjuje kvalitetu grafičkog prikaza a istovremeno drastično smanjuje korištenje računalnih resursa. [7]

S obzirom da veličine mipmapa dijele s potencijom broja 2 (2, 4, 8, 16) postoje točke na teksturi gdje se mogu koristiti dvije mipmape što može rezultirati u zamućivanju i drugim vizualnim artefaktima što se izbjegava kroz korištenje odgovarajuće metode filtriranja. Temeljna metoda filtriranja je bilinearna i vrlo je jednostavna uz niske računalne zahtjeve: za izračunavanje krajnje boje nekog teksturnog piksela, grafički engine uzima 4 teksturna uzorka iz određene mipmape na približnom položaju teksturnog piksela na ekranu te mu dodjeljuje prosječno obojenje odabrana 4 uzorka. Iako engine uzima u obzir kut teksturiranog objekta u odnosu na točku promatranja, bilinearno filtriranje uzima uzorak iz samo jedne mipmape koju dodjeljuje engine što rezultira u smanjenoj jasnoći ukoliko se na određeni teksturni piksel (eng. texel) nalazi na granici između dvije različite mipmape različite rezolucije. Trilinearno

filtriranju izračunava prosječno obojenje texela koristeći uzorke iz dvije mipmape bliske razlučivosti no kao i bilinearna metoda nailazi na probleme kod texela koji se nalaze pod oštrim kutom u odnosu na točku promatranja zbog toga što su tada texeli razvučeni tj. dužina im je veća od širine ili obrnuto. [7]



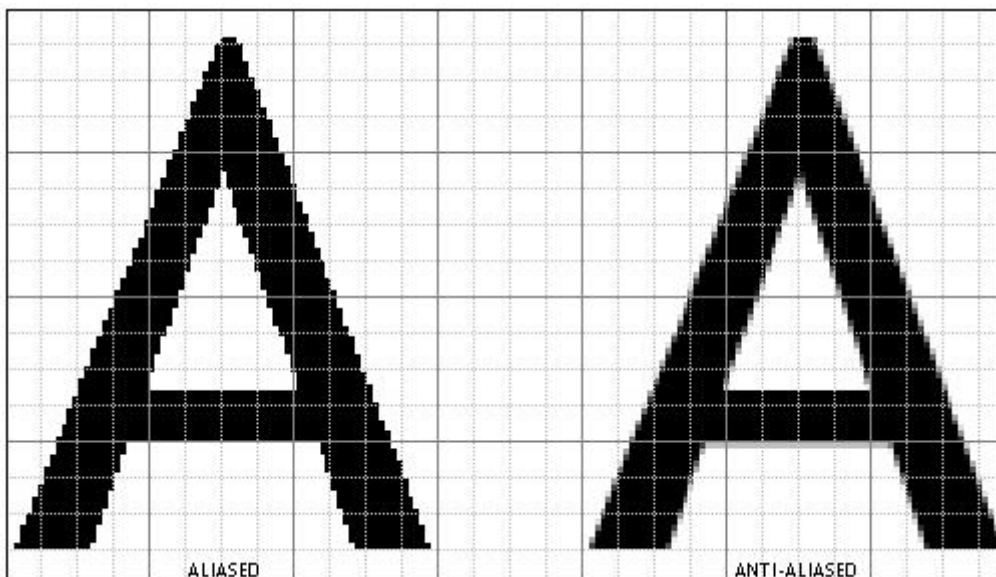
Slika 5.1. Usporedba različitih vrsta teksturnog filtriranja [7]

Za razliku od bilinearne i trilinearne metode, anizotropno filtriranje omogućuje znatno veću kvalitetu prikaza uz malo veće zahtjeve računalnih resursa. Anizotropija je po definiciji svojstvo teksturnih piksela zbog kojeg imaju različit iznos širine ili visine koje se javlja u svakom slučaju kada tekstura nije pod pravim kutom u odnosu na kameru. Kao što je ranije spomenuto, kod bilinearnog i trilinearnog filtriranja pojavljuju se problemi kod kosih površina jer se kod njihovog korištenja pretpostavlja da je površina pod pravim kutom na točku gledišta što se rijetko događa. Također, mipmape su izotropne tj. istih dimenzija visine i širine te problemi nastaju kod trapezoidnih oblika texela. Anizotropno filtriranje skalira visinu odnosno širinu mipmape u odnosu na vrijednost koja označava perspektivne distorzije teksture. Odnos je ovisan o maksimalnoj dopuštenoj vrijednosti. Anizotropno filtriranje funkcionira na razinama od 1 (bez skaliranja) i 16 koje opisuju do koje se mjere mipmapa može skalirati. Korisniku su u pravilu ponuđene vrijednosti potencije proja 2; 2x, 4x, 8x, 16x. Razlika između odabranih postavki odnosi se na maksimalni kut po kojem će filter izračunati određenu

teksturu. Npr. četverostruki filter prikazuje odgovarajuće teksture na površinama koje su pod dvostruko oštrijim kutom u odnosu na kameru dok će teksture u rasponu u kojem je odgovarajuće 2x filtriranje ostati nepromijenjene. Što višu razinu anizotropnog filtriranja koristimo, sve je upitnije koliko je isplativo koristiti ga s obzirom da se s povećanjem kuta teksture smanjuje broj susreta s maksimalnim kutom prikazivanja. [7]

6. Izgladivanje rubova

Izgladivanje rubova (eng. antialiasing) je tehnika iscrtavanja čija je svrha smanjenje pojave aliasinga, vizualne greške koja izgleda poput stepenica na pojedinim rubovima objekta unutar 3D scene koji nisu iscrtanim pod pravim kutom na ekranu. Aliasing je posljedica jedne od temeljnih operacija modernih 3D sustava, rasterizacije. Rasterizacija je proces pretvaranja slike koja posjeduje praktično beskonačnu količinu detalja u oblik koji se iscrtava na mreži piksela određene razlučivosti (računalnom monitoru). Aliasing je neželjeni rezultat navedenog procesa zbog toga što grafički engine iscrtava piksele kroz koje prolazi rub objekta samo u slučaju da objekt zauzima više od 50% površine piksela što rezultira u zupčastom izgledu rubova za koje ljudsko oko očekuje da su glatke linije. [8]



Slika 6.1. Prikaz utjecaja metode izgladivanja rubova na piksel grafiku [8]

Kao kod anizotropnog filtriranja, postoji više metoda izgladivanja rubova, svaka sa svojim prednostima i nedostacima. Najpopularnije metode su **superuzorkovanje** (eng. supersampling) i **multiuzorkovanje** (eng. multisampling) s tim da je cilj obje metode jednak: prikazivanje posredne boje za određeni piksel temeljno na izračunavanju susjednih pod-piksela

(virtualnih piksela čije vrijednosti grafički sustav izračunava ali ne prikazuje direktno na ekranu) s ciljem realističnijeg prikaza rubova objekta. Razlika između navedenih metoda nalazi se u načinu na koji one izračunavaju krajnje obojenje piksela. [8]

Superuzorkovanje je tzv. „nasilna“ (eng. brute-force) metoda izračunavanja boje koja radi na način da tjera GPU da izračunava obojenje pojedine scene u višestruko većoj rezoluciji (npr. temeljna rezolucija ekrana je $1680 \times 1050 \times 4$ uzorka = 3360×2100) te uzme prosječno obojenje piksela koji se nalaze na poziciji piksela koji sačinjavaju rub koji želimo izglati prije smanjenje razlučivosti slike na njenu temeljnu vrijednost. Nakon smanjenja rezolucije, GPU također smanjuje i broj detalja slike da bi se dobila oštrija slika. Superuzorkovanje je zaglađivanja rubova koja funkcionira na cjelokupnoj sceni, odnosno izračunava prosječne vrijednosti svakog piksela na sceni umjesto izračunavanja samo rubnih piksela što rezultira u vrlo dobrom izgledu krajnje scene no njeni hardverski zahtjevi su ogromni zbog toga što od grafičkog sustava zahtijeva višestruko veću količinu izračuna. [8]

Multiuzorkovanje također iscrtava scenu u višoj rezoluciji od nativne kao što je slučaj i kod superuzorkovanja no u svrhu uštede vremena kod procesuiranja svaki podpiksel nasljeđuje vrijednost boje od prvotnog uzorka te svakom podpiksela dodjeljuje vlastitu vrijednost koja označuje virtualnu udaljenost od kamere (superuzorkovanje svakom podpiksela dodaje posebnu vrijednost za boju i za udaljenost). S obzirom da je grafički sustav svjestan koji pikseli se prikazuju kada se razlučivost smanjuje na nativnu, konačno obojenje svakog piksela se dodjeljuje uz pomoć vrijednosti udaljenosti: ako svi podpikseli određenog prikazanog piksela nemaju jednaku udaljenost od kamere, znači da se spomenuti piksel nalazi na rubu objekta i potrebno je promijeniti njegovu prozirnost uzevši u obzir broj podpiksela te broj podpiksela s različitim vrijednostima udaljenosti (za 4x iznose 100%, 75%, 50%, 25%, 0%). Ova metoda ima značajno niže zahtjeve od superuzorkovanja i omogućuje višu brzinu izvođenja te je zbog toga omogućena u većini 3D igara. [8]

Manje popularne metode zaglađivanja rubova:

- **CSAA** (NVidia) i **EQAA** (AMD): tehnike izgladivanja rubova slične multiuzorkovanju no s drastično manjim zahtjevima
- **FXAA**: brzo približno izgladivanje rubova (eng. fast approximate antialiasing) zaglađuje rubove na svim objektima prisutnim u sceni uz niske zahtjeve no uz negativnu stranu zamućivanja slike

- **TXAA:** vremensko zaglađivanje rubova (eng. temporal antialiasing) radi na nekolicini suvremenih grafičkih kartica, postiže bolje rezultate od FXAA, djelomično zamućuje sliku te koristi nešto više računalnih resursa [9]

7. Napredno osvjetljenje

“Osvjetljenje u video igrama je prošlo dalek put od vremena igara poput Doom i Ultima Underworld. S ručno bojanih slika koja predstavljaju čudovišta, bez ikakvog dinamičnog svjetla, došli smo do fizički korektnog osvjetljenja. U svojim je 12 godina EVE Online promijenio nekolicinu različitih modela osvjetljenja i tek je nedavno izdao osvjetljenje bazirano na fizici.” - Steve Manekeller [10]



Slika 7.1. Usporedni prikaz scene sa i bez korištenja naprednog osvjetljenja

Sljedovi specijalnih efekata se u filmovima iscrtavaju koristeći snažna računala koja satima iscrtavaju svjetlo simulirajući umjetne zrake svjetlosti da mi ispravno osvijetlile svaki kadar filma. No to nije moguće u video igrama zbog stalne promjene kutova kamere i nepredvidivih pokreta igrača. Video igre moraju svjetlo iscrtavati u realnom vremenu te se koriste trikovima da bi pojednostavile navedeni proces. U početku su određena područja bila obojana svjetlije. Uskoro su se pojavila nepomična svjetla s pravim usmjerenim svjetlom u svrhu iscrtavanja sjena. Efekti poput umjetnih refleksija i odsjaju leća pojavili su se nakon toga. [10]

Sve kompleksniji i kompleksniji sustavi osvjetljenja postavljali su se jedan na drugi da bi se stvarale što realnije scene. No uz pomoć posljednje generacije računalnih sustava, moguće je prikazati svjetlost uz pomoć fizičkih modela temeljenih na načinu na koji se svjetlo ponaša u stvarnom svijetu.

“Radiozitet - svjetlost koja ispunjava svijet kroz odbijanje od različitih površina - zloglasno je kompleksno za izračunati u realnom vremenu, pa smo problem pojednostavili do točke gdje je praktično ažurirati odbijeno svjetlo na dinamičan način. No ispod tih pretpostavki nalazi se model koji je fizički korektan i replicira ono što se događa u realnom svijetu. To je ključno kako za kvalitetu krajnje slike tako i za predvidljivost koju daje umjetnicima” - Chris Doran, osnivač grafičke tvrtke Geometrics [10]

Geometrics je tvorac Enlighten-a, programskog dodatka (eng. addon) koji grafičkim programskim sustavim koji pokreću video igra pomaže kod stvaranja scena s kompleksnim indirektnim svjetlom. Svjetlo tada daje dojam kretanja kroz prostor, tj. postaje voluminozno. Uz pomoć navedene tehnologije, svjetlo, sjene i refleksije imitiraju stvarni svijet. Svjetlost se kreće kroz zrak te uvjerljivo te djeluje na sve oko sebe. Svjetlo iz svjetiljke se raspršuje u magli, u prašini se stvaraju zrake sunčevog svjetla, svjetlost se odbija od objekata, odbija od njih ovisno o površinskom materijalu i time stvara dodatno ambijentalno svjetlo. Rezultat toga su svjetovi u koje se lakše uživiti i koji daju dojam stvarnih mjesta. [10]

7.1. Bloom

Intenzivni izvori svjetla i intenzivno osvijetljena područja scene često je vrlo teško dočarati s obzirom na ograničeni intenzitet svjetla koji računalni monitori mogu postići. Jedan od načina razlikovanja intenzivnih izvora na monitoru je da im se dodaje vizualno sijanje, odnosno njihovo svjetlo osvjetljuje neposredan prostor oko izvora. To u praksi gledateljima daje do znanja da je izvor koji trenutačno promatraju intenzivan, odnosno određena područja su bolje osvijetljena od ostalih. [12]

Navedeni efekt sijanja dobiva se postupkom pod nazivom “bloom”. Primjer scene na kojoj se vidi razlika između korištenja i ne korištenja efekta:



Slika 7.2. Razlika u sceni sa i bez korištenja bloom efekta [10]

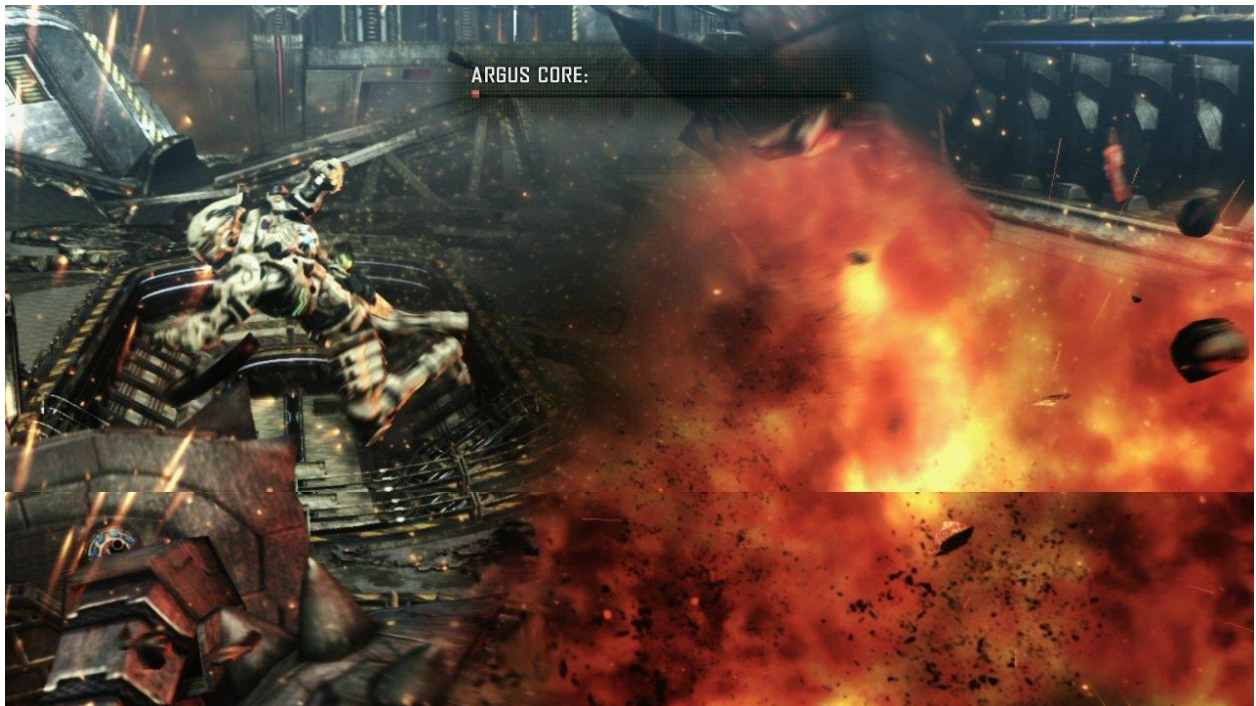
Bloom daje primjetne vizualne znakove u vezi osvjetljenja objekata i kada se koristi u odgovarajućoj količini (mnoge igre drastično pretjeruju s korištenjem efekta) značajno može upotpuniti scenu i igri dodaje dodatnu dramatičnu dimenziju. Bloom najbolje funkcionira u kombinaciji s HDR iscrtavanjem. Česta se pogrešno pretpostavlja da su HDR i bloom jedan te isti efekt zbog toga što mnogi naizmjenično koriste ova dva pojma. Jedan i drugi efekt mogu se koristiti posebno, no najbolji vizualni rezultati se postižu kada se koriste u kombinaciji. Za implementaciju bloom efekta potrebno je iscrtati scenu te izolirati HDR obojenje scene i sliku scene gdje su vidljivi samo osvjetljeni dijelovi. Dobivena se slika potom zamučuje (eng. *blur*) i postavlja na uobičajenu sliku scene. [14]

8. Vertikalna sinkronizacija

Vertikalna sinkronizacija (eng. vertical synchronisation) je opcija u grafičkim postavkama igara koja smanjuje broj slika iscrtanih u sekundi na broj pojedinačnih osvježavanja prikaza na ekranu u sekundi. Npr. ako imamo monitor od 60Hz, vertikalna sinkronizacija prilagođava broj iscrtanih slika u sekundi na 60. Navedena mogućnost grafičkog sustava postala je nužna u danima velikih CRT monitora koji su se osvježavali na način da bi uz pomoć magnetskog polja utjecali na smjer snopa elektrona unutar samog ekrana u pravilnim intervalima da bi iscrtali željenu sliku.

U savršenoj situaciji bi broj slika koji grafički sustav generira u sekundi bio savršeno usklađen sa stopom osvježavanja ekrana što bi osiguralo da svaki put kad grafički sustav spremi sliku u grafičku međumemoriju monitor je spreman pročitati informacije o slici iz međumemorije i iscrtati je na ekranu. Problem se javlja kada grafički sustav procesira slike i sprema ih u video memoriju brže nego ih monitor može prikazati što rezultira grafičkim distorzijama jer monitor iscrtava jednu sliku preko druge. [11]

V-Sync se koristi kada su na ekranu primjetne grafičke distorzije uzrokovane pomicanjem u igri tijekom dijelova kada se prikaz na ekranu brzo mijenja, najčešće kod akcijskih sekvenci, ili kod gledanja filmova na računalu. Kada grafički sustav izračunava slike brže nego se one mogu prikazati, dodatne slike završe na ekranu iscrtane povrh prijašnje i rezultiraju u neobičnim grafičkim distorzijama koje rezultiraju neravnim linijama unutar igara te objekti često izgledaju “prerezano”. Zajednički naziv za navedene greške je lomljenje zaslona (eng. screen tearing) i omogućavanje vertikalne sinkronizacije ih u potpunosti uklanja na način da sprječava slanje preračunatih slika u grafičku memoriju prije nego je monitor spreman za iscrtavanje čime se osigurava gladak tok igre. [11]



Slika 8.1. Prikaz lomljenja zaslona [11]

Ovisno o vrsti vertikalne sinkronizacije koja se koristi, omogućavanje ove opcije može imati negativan utjecaj na brzinu izvođenja igara. Najjednostavniji i najpopularniji način ispravljanja navedenih anomalija je da se stvori dvostruka (ponekad trostruka) međumemorija u sistemskoj memoriji u koju se spremaju dodatne slike i šalju u monitor na iscrtavanje u odgovarajućem trenutku. Dodatna međumemorija osigurava mnogo glađu i ljepšu sliku, no može uzrokovati probleme kod igara koje zahtijevaju brzu reakciju igrača na događaje koji se odvijaju na ekranu jer grafički sustav preračunava događaje koji se događaju dvije ili tri slike unaprijed, odnosno, na ekranu se prikazuju starije slike od onih koje preračunava grafički sustav. To znači da kad grafički sustav izračunava sliku događaja koji su direktna posljedica uputstava danih putem tipkovnice i miša, javlja se maleni zaostatak (mjereno u milisekundama) u napravljenim akcijama i njihovom prikazu na ekranu. Većina korisnika nikada neće primijetiti navedeni zaostatak, no vrlo zahtjevni igrači, posebice na natjecanjima, trpe lomljenje zaslona u zamjenu za maksimalnu brzinu izvođenja. Moderne tehnike vertikalne sinkronizacije eliminiraju navedeni zaostatak na način da u međumemoriju preračunava više slika istovremeno. [11]

9. Testiranje i rezultati

9.1. Konfiguracija

- Intel Pentium G620
- 8 GB RAM
- Windows 10 x64
- NVIDIA GeForce GTX 650

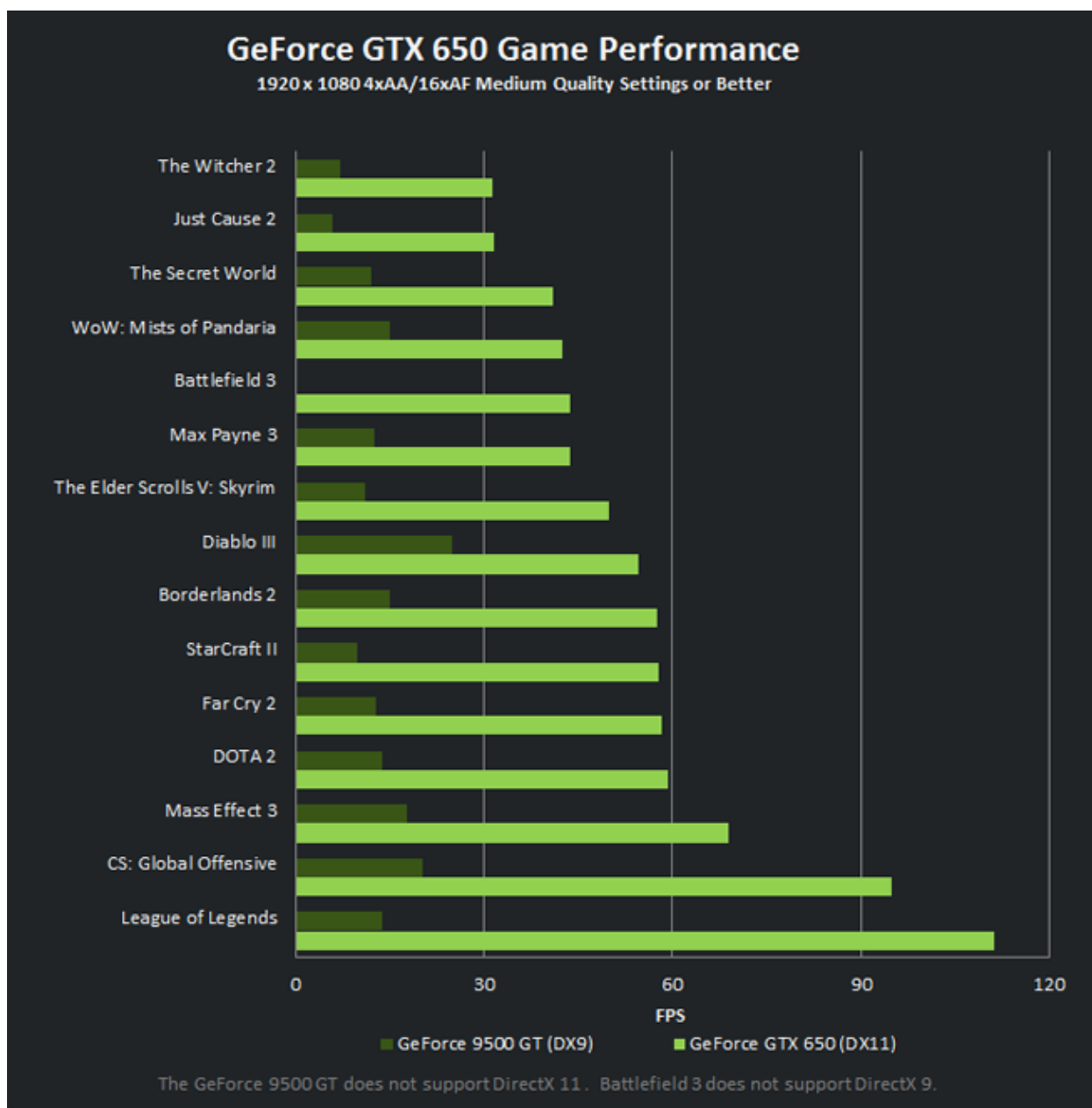
Tablica 9.1. Osnovni podaci o procesoru Intel Pentium G620

Intel Pentium G620	
Broj jezgri	2
Temeljna frekvencija procesora	2.60 GHz
Veličina međumemorije	3 MB
Brzina podatkovne sabirnice	5 GT/s
Prosječna otpuštena termalna energija	65 W
Maksimalna količina RAM	32 GB
Podržana vrsta RAM	DDR3 1066
Maksimalan broj memorijskih kanala	2
Maksimalna pojasna širina	17 GB/s

Tablica 9.2. Osnovni podaci o grafičkoj kartici NVIDIA GeForce GTX 650

NVIDIA GeForce GTX 650	
Čip	GK107
Broj CUDA jezgri	1058 MHz
Temeljna frekvencija	1058 MHz
Količina grafičke memorije	1 GB
Brzina memorije	5.0 GB/s
Maksimalna pojasna širina	80 GB/s
Prosječna otpuštena termalna energija	64 W

GeForce GTX 650 je NVIDIA-in osnovni model grafičkog procesora. GTX 650 pokreće 384 CUDA jezgri i 1GB pripadne grafičke memorije te je u mogućnosti pokretati moderne igre na srednje zahtjevnim postavkama ne rezoluciji od 1920x1080. Za usporedbu, GTX 650 postiže 812 gigaflopsa grafičke snage što je trostruko više od Xenos GPU-a koji se nalazi u konzoli Xbox 360. [13]



Slika 9.1. Prikaz performansi igara izvođenih na grafičkoj kartici NVIDIA GeForce GTX 650 [12]

Kao što je vidljivo na dijagramu, GTX 650 postiže dobre rezultate u popularnim igrama poput League of Legends, Counter-Strike: Global Offensive i DOTA 2 na 1920x1080 na visokim i vrlo visokim postavkama prikaza. U igri World of Warcraft: Mists of Pandaria, GTX 650 postiže 46 FPS koristeći DirectX 11 i uključenim četverostrukim MSAA dok sa istim postavkama grafički procesor prijašnje generacije postiže samo 12 FPS. [13]

Testiranje utjecaja opcija na performanse izvođenja igara izvedeno je na 10 različitih igara i grafičkih programskih pokretača. Igre se razlikuju na mnogo načina, od žanra, godine

izdavanja, temeljnih računalnih zahtjeva, cijene te ciljane publike. Testiranje je izvršeno na sada već staroj konfiguraciji, no uzme li se u obzir prosječna dob testiranih igara, računalni zahtjevi i performanse računala su odgovarajuće i nijedna igra nema većih problema pri izvođenju.

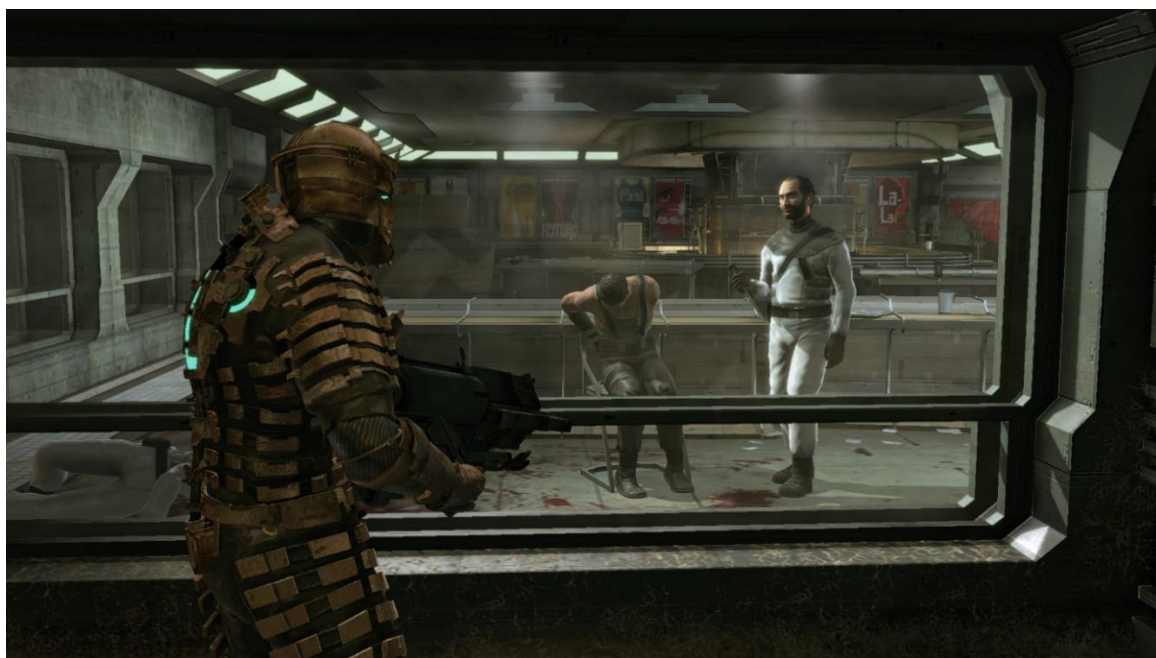
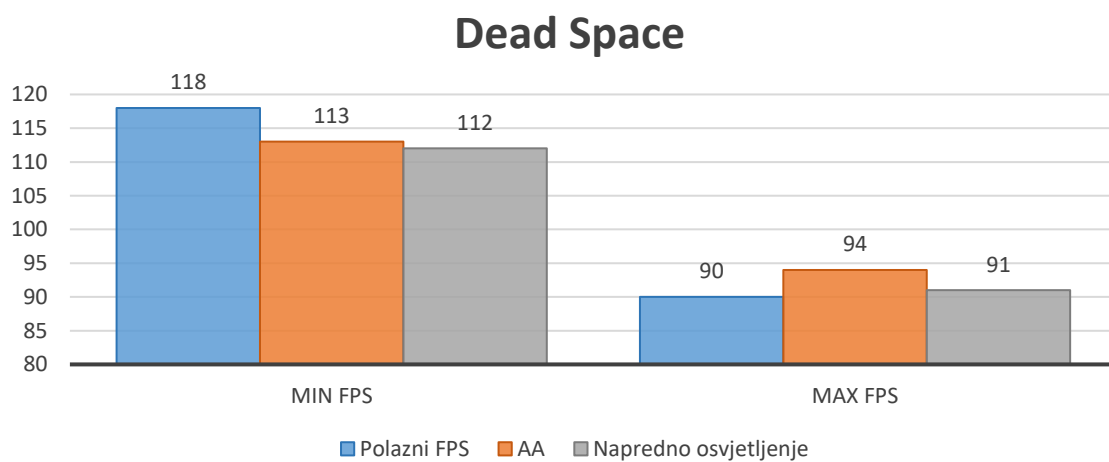
Testiranje je izvedeno na nekoliko različitih načina. **MIN FPS** označava prosječni broj slika u sekundi postignutih na minimalnim postavkama igre na temeljnoj rezoluciji ekrana od 1920x1080 sa minimalnom razlučivošću tekstura i isključenim svim ostalim tehnikama poboljšanja prikaza s ciljem određivanja količine usporavanja brzine izvođenja kada se određena napredna tehnika uključi te ukoliko je moguće, da se uključi u najvećoj mogućoj mjeri (npr. anizotropno filtriranje x16). **MAX FPS** je prosječan broj slika u sekundi koje igra postiže na rezoluciji 1920x1080 sa maksimalnom razlučivošću tekstura te uključenim svim mogućim tehnikama poboljšanja grafičkog prikaza. Određena tehnika tada se u potpunosti isključuje ili smanjuje na najmanju moguću razinu da bi se dobila razina uštede računalnih resursa te time i ubrzanje izvođenja igre.

Svi testovi odrađeni su kroz dio igre sa sličnom ili jednakom količinom akcije na ekranu, broju modela na ekranu i slično, generalno kroz jednu razinu igre, da bi se dobili usporedivi rezultati i da bi se dobila točna razina utjecaja.

9.2. Igre

Tablica 9.3. Osnovne informacije o igri Dead Space

Naziv	Dead Space
Žanr	FPS
Razvojni studio	EA Redwood Shores Studio
Izdavač	EA
Datum izdavanja	14.10.2008.
Platforme	Xbox 360, PS3, PC
Grafički pokretač	The Godfather engine - vlastiti

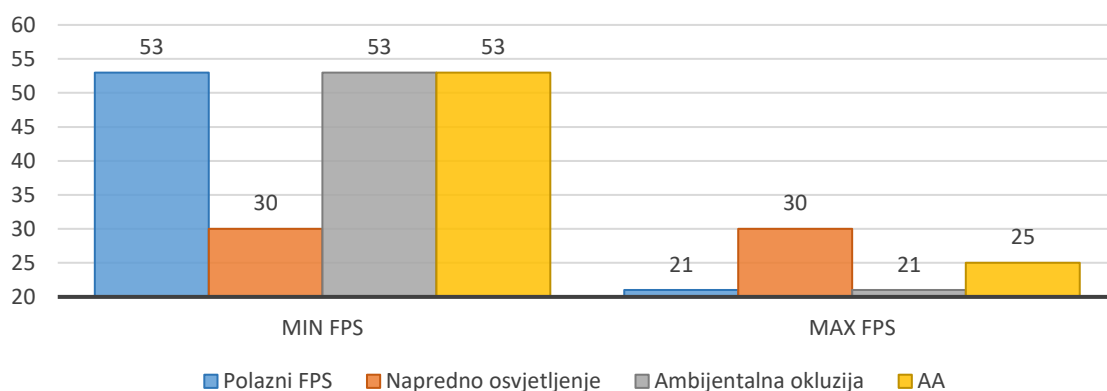


Slika 9.1. Prikaz zaslona igre Dead Space

Tablica 9.4. Osnovne informacije o igri DiRT Showdown

Naziv	DiRT Showdown
Žanr	Auto utrke
Razvojni studio	Codemasters
Izdavač	Codemasters
Datum izdavanja	23.4.2012.
Platforme	Xbox 360, PS3, PC
Grafički pokretač	EGO Engine

DiRT Showdown

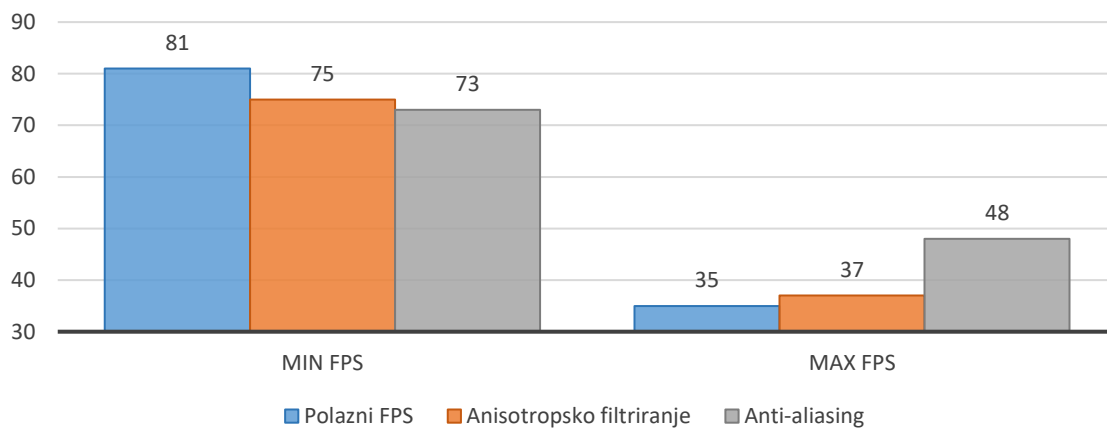


Slika 9.2. Prikaz zaslona igre DiRT: Showdown

Tablica 9.5. Osnovne informacije o igri *The Elder Scrolls V: Skyrim*

Naziv	The Elder Scrolls V: Skyrim
Žanr	RPG
Razvojni studio	Behtesda Game Studios
Izdavač	Bethesda Softworks
Datum izdavanja	11.11.2011.
Platforme	Xbox 360, PS3, PC
Grafički pokretač	Creation Engine

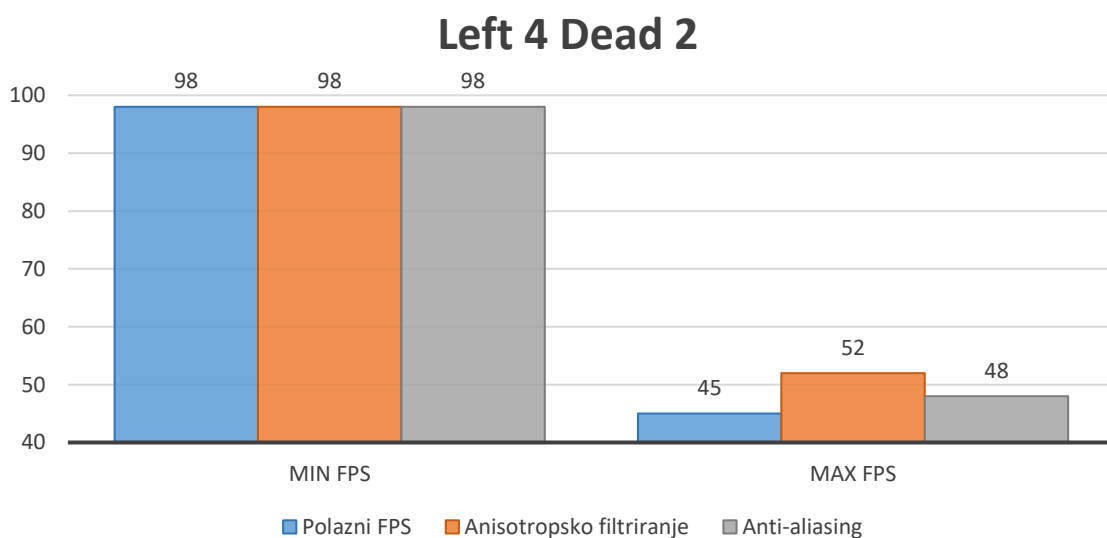
The Elder Scrolls V: Skyrim



Slika 9.3. Prikaz zaslona igre *The Elder Scrolls V: Skyrim*

Tablica 9.6. Osnovne informacije o igri Left 4 Dead 2

Naziv	Left 4 Dead 2
Žanr	FPS
Razvojni studio	Valve
Izdavač	Valve
Datum izdavanja	17.11.2009.
Platforme	Xbox 360, Mac, PC, Linux
Grafički pokretač	Source engine

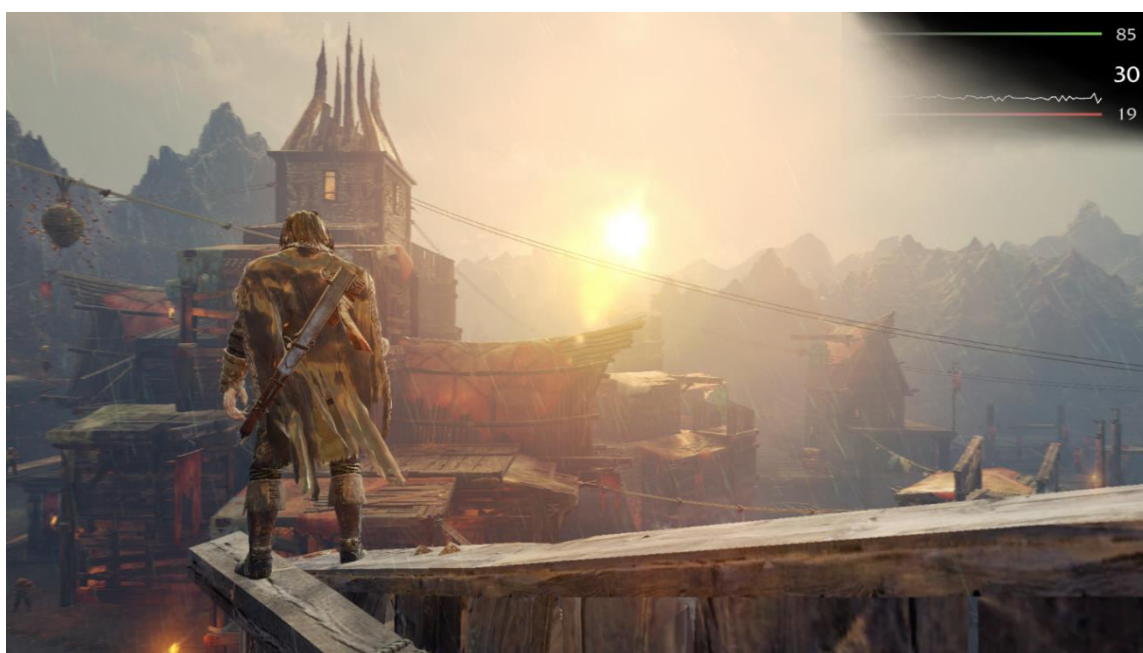
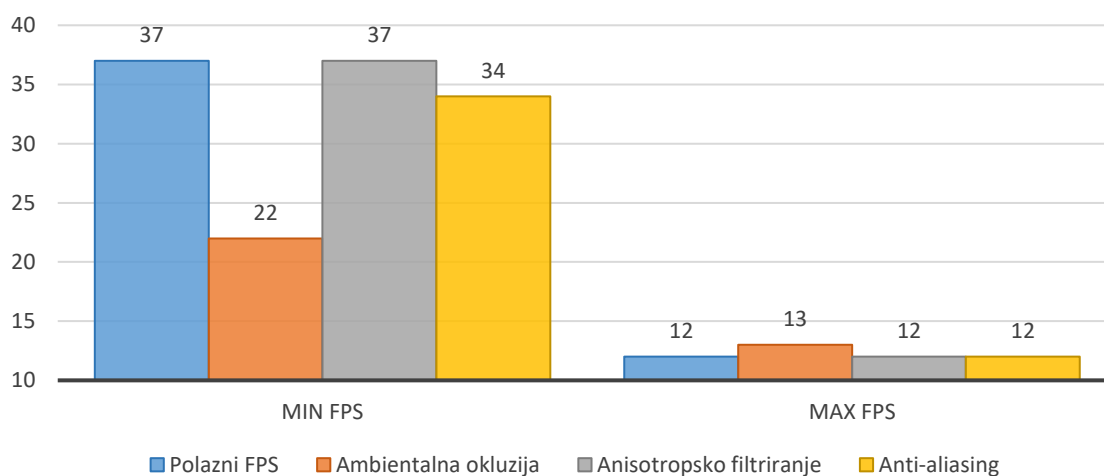


Slika 9.4. Prikaz zaslona igre Left 4 Dead 2

Tablica 9.7. Osnovne informacije o igri Middle-Earth: Shadow of Mordor

Naziv	Middle-Earth: Shadow of Mordor
Žanr	RPG
Razvojni studio	Monolith Productions
Izdavač	Warner Bros. Interactive
Datum izdavanja	30.9.2014.
Platforme	Xbox 360, XBox One, PS3, PS4, PC
Grafički pokretač	LithTech

Middle-Earth: Shadow of Mordor

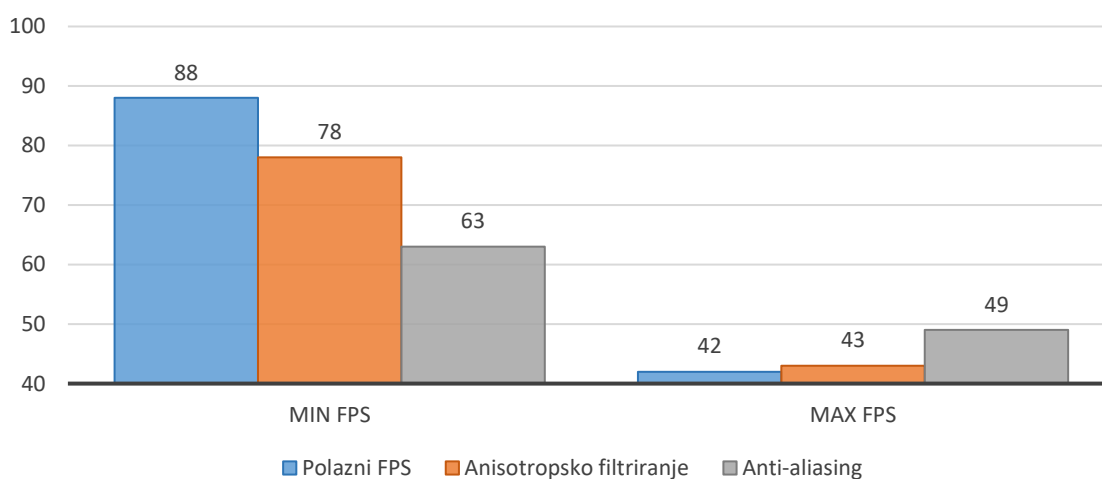


Slika 9.5. Prikaz zaslona igre Middle-Earth: Shadow of Mordor

Tablica 9.8. Osnovne informacije o igri Path of Exile

Naziv	Path of Exile
Žanr	Akcijski RPG
Razvojni studio	Grinding Gear Games
Izdavač	Grinding Gear Games
Datum izdavanja	23.1.2013. (otvorena beta)
Platforme	PC
Grafički pokretač	Samostalno razvijeni

Path of Exile

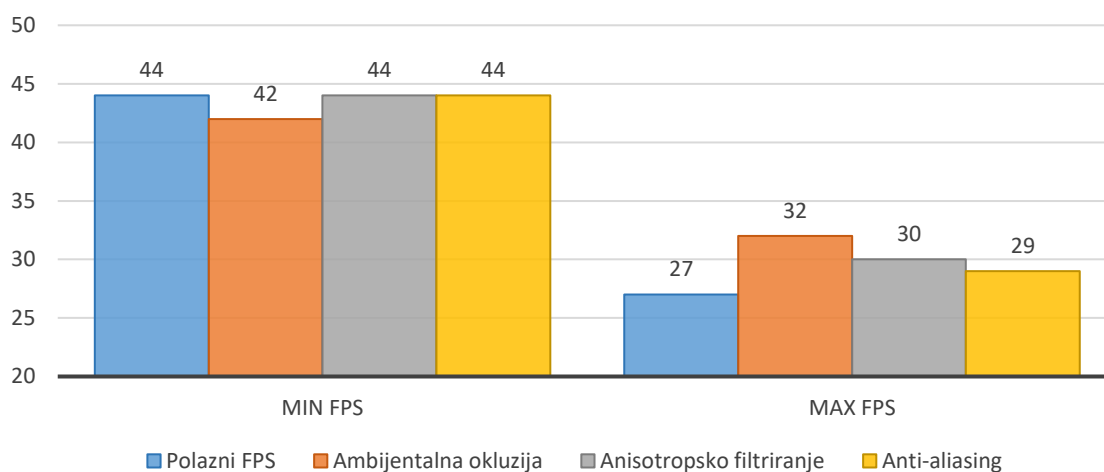


Slika 9.6. Prikaz zaslona igre Path of Exile

Tablica 9.9. Osnovne informacije o igri Shadow Warrior

Naziv	Shadow Warrior
Žanr	FPS
Razvojni studio	Flying Wild Hog
Izdavač	Devolver Digital
Datum izdavanja	26.9.2013.
Platforme	PC, XBox One, PS4
Grafički pokretač	RoadHog Engine

Shadow Warrior

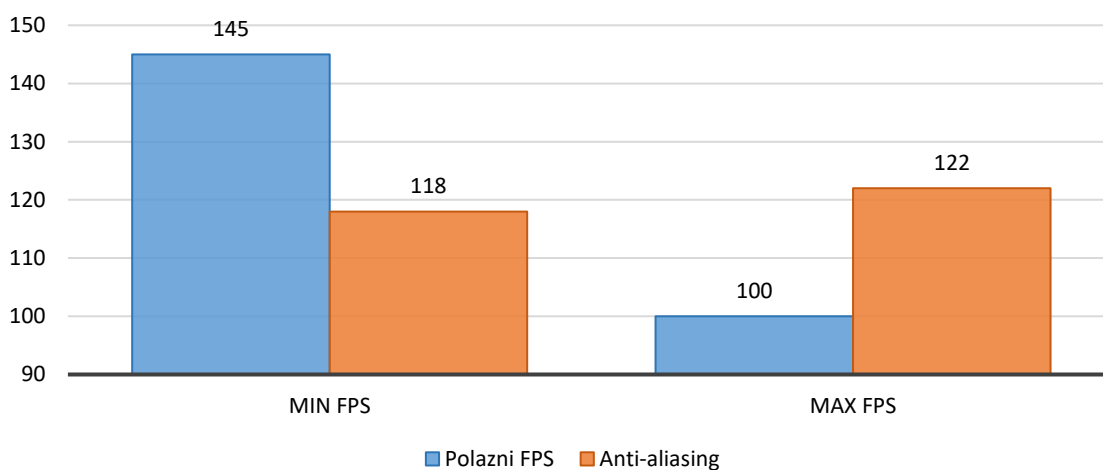


Slika 9.7. Prikaz zaslona igre Shadow Warrior

Tablica 9.10. Osnovne informacije o igri Sid Meier's Civilization IV

Naziv	Sid Meier's Civilization IV
Žanr	Strategija na poteze
Razvojni studio	Firaxis
Izdavač	2K Games
Datum izdavanja	24.10.2005.
Platforme	PC, Mac, Cell
Grafički pokretač	Gamebryo Engine

Civilization IV

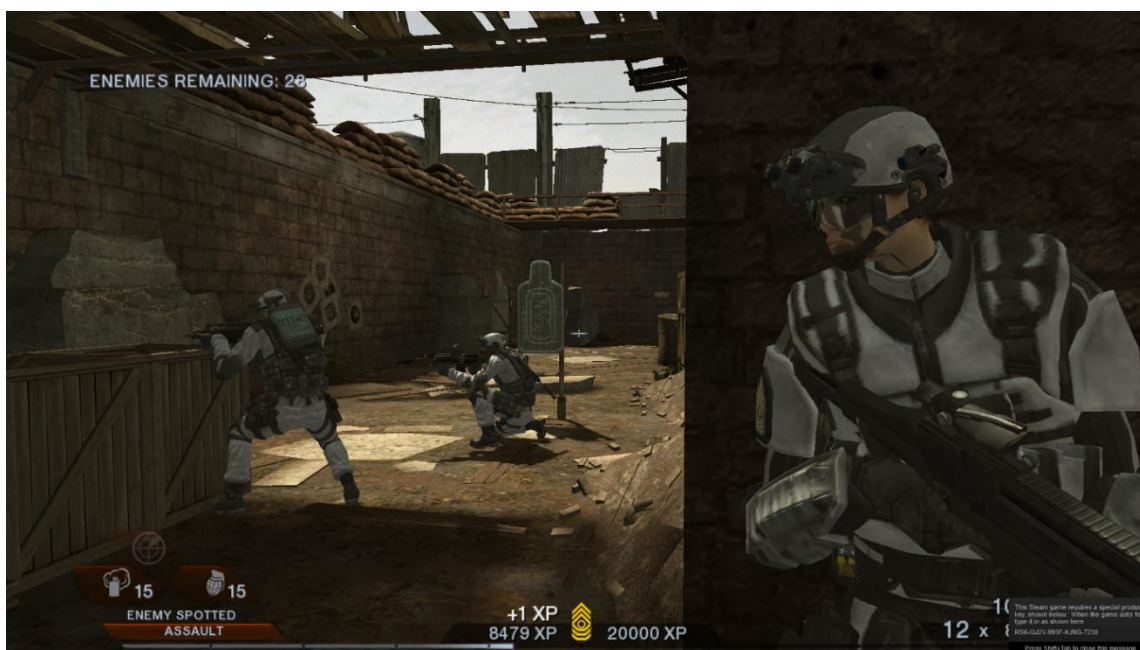
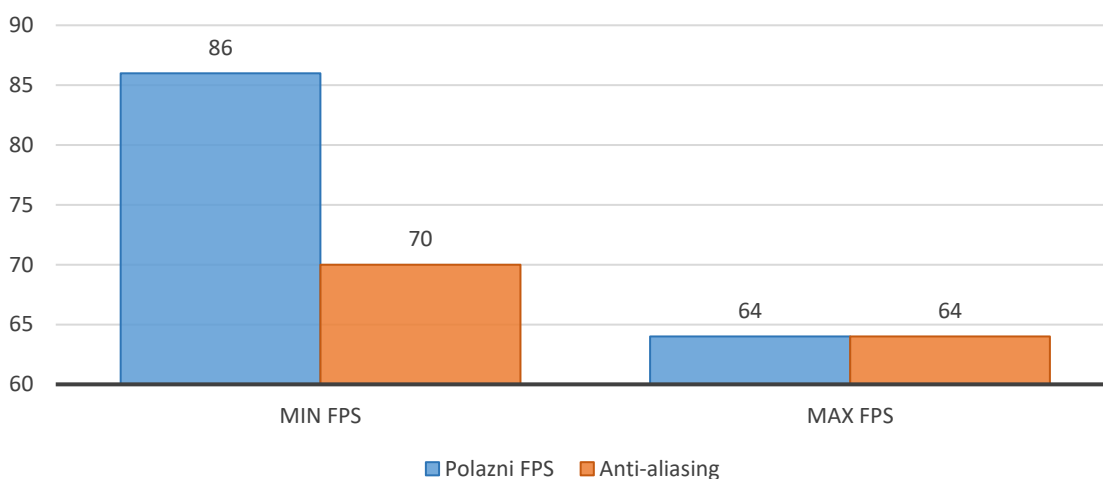


Slika 9.8. Prikaz zaslona igre Sid Meier's Civilization IV

Tablica 9.11. Osnovne informacije o igri Tom Clancy's Rainbow Six: Vegas 2

Naziv	Tom Clancy's Rainbow Six: Vegas 2
Žanr	Taktički FPS
Razvojni studio	Ubisoft Montreal
Izdavač	Ubisoft
Datum izdavanja	18.4.2008.
Platforme	PC, XBox 360, PS3
Grafički pokretač	Unreal Engine 3, Havok

Tom Clancy's Rainbow Six: Vegas 2

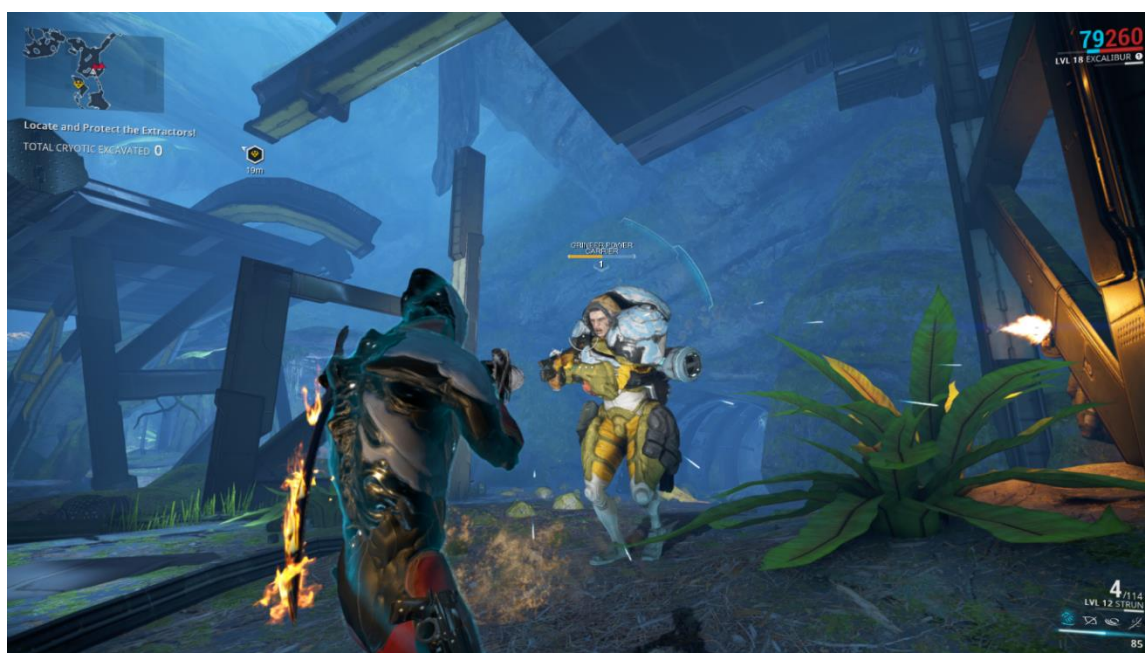
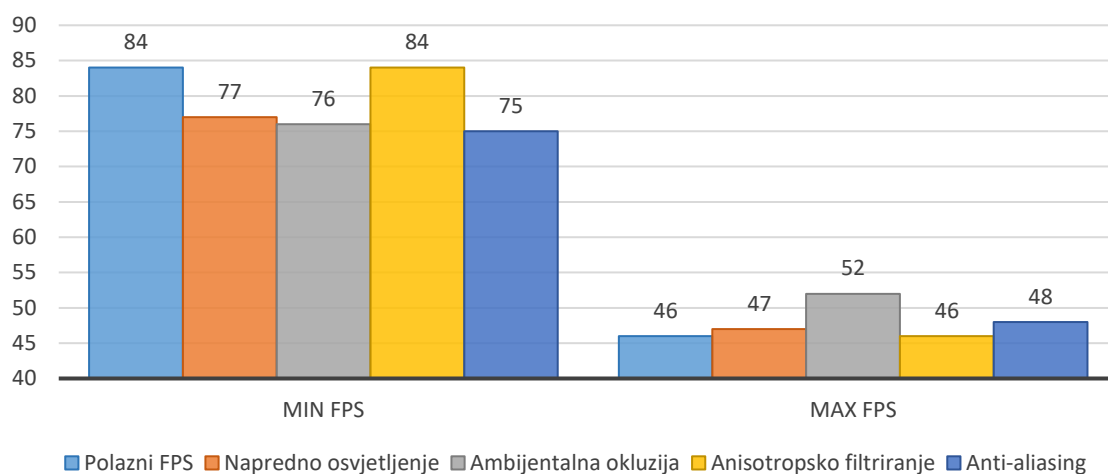


Slika 9.9. Prikaz zaslona igre Tom Clancy's Rainbow Six: Vegas 2

Tablica 9.12. Osnovne informacije o igri Warframe

Naziv	Warframe
Žanr	MMOFPS
Razvojni studio	Digital Extremes
Izdavač	Digital Extremes
Datum izdavanja	25.4.2013.
Platforme	PC, XBox One, PS4
Grafički pokretač	Evolution Engine

Warframe

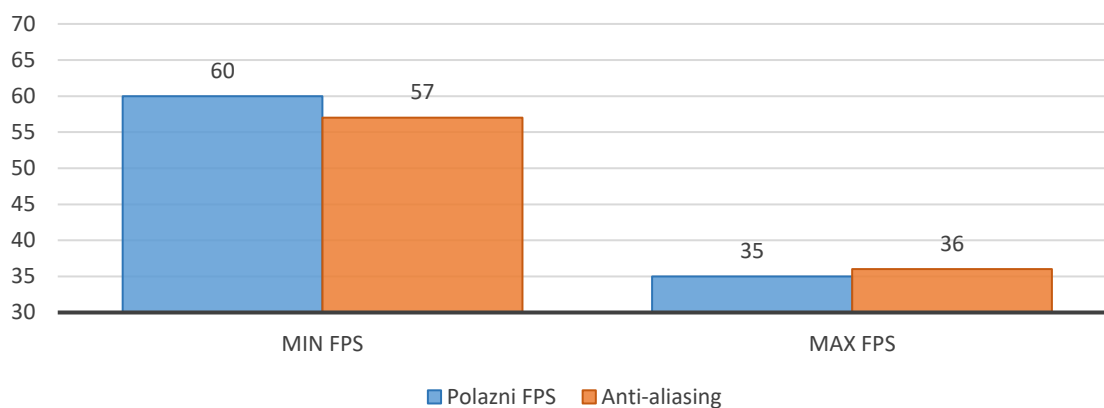


Slika 9.10. Prikaz zaslona igre Warframe

Tablica 9.13. Osnovne informacije o igri Warhammer 40,000: Dawn of War 2 - Retribution

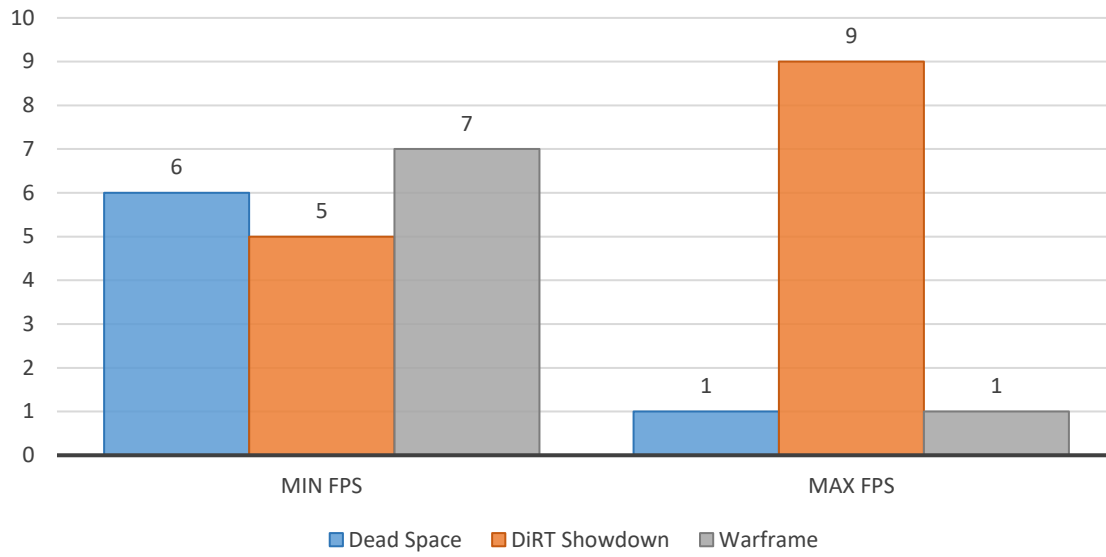
Naziv	Warhammer 40,000: Dawn of War 2 - Retribution
Žanr	RTS
Razvojni studio	Relic
Izdavač	THQ
Datum izdavanja	1.4.2011.
Platforme	PC
Grafički pokretač	Essence Engine

Warhammer 40,000: Dawn of War 2 - Retribution

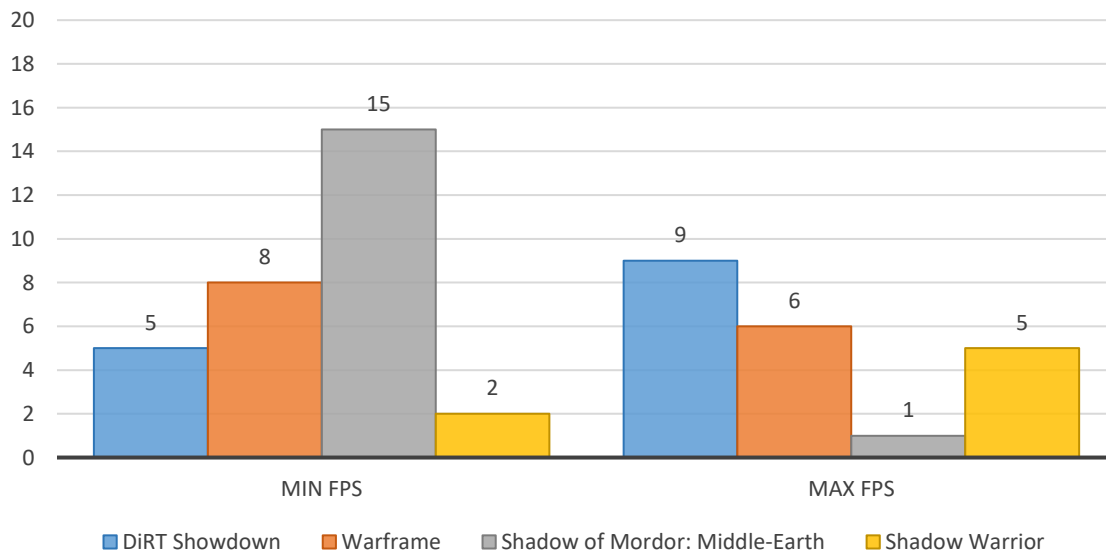


Slika 9.11. Prikaz zaslona igre Warhammer 40,000: Dawn of War 2 - Retribution

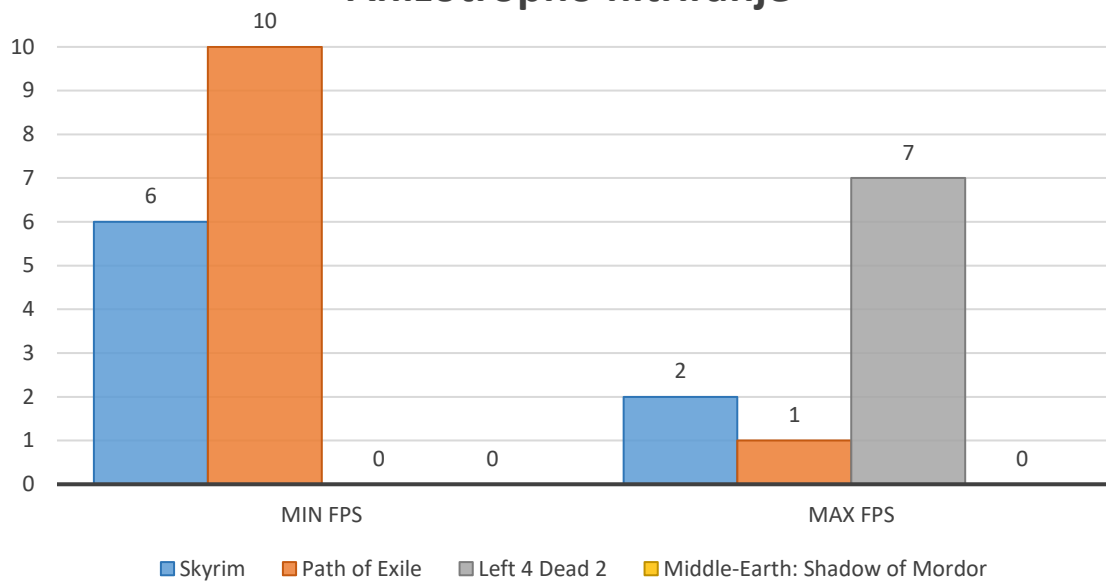
Napredno osvjetljenje



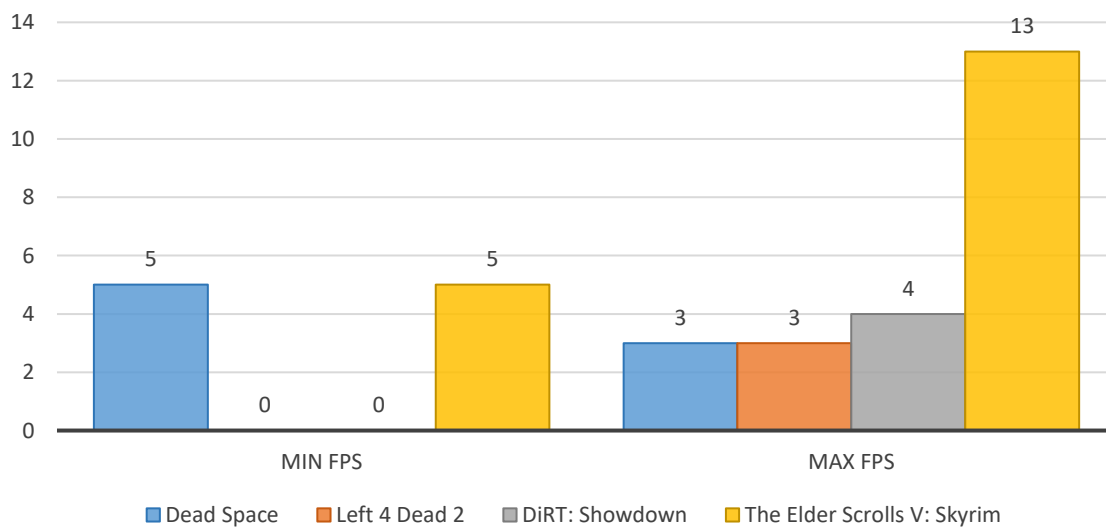
Ambijentalna okluzija



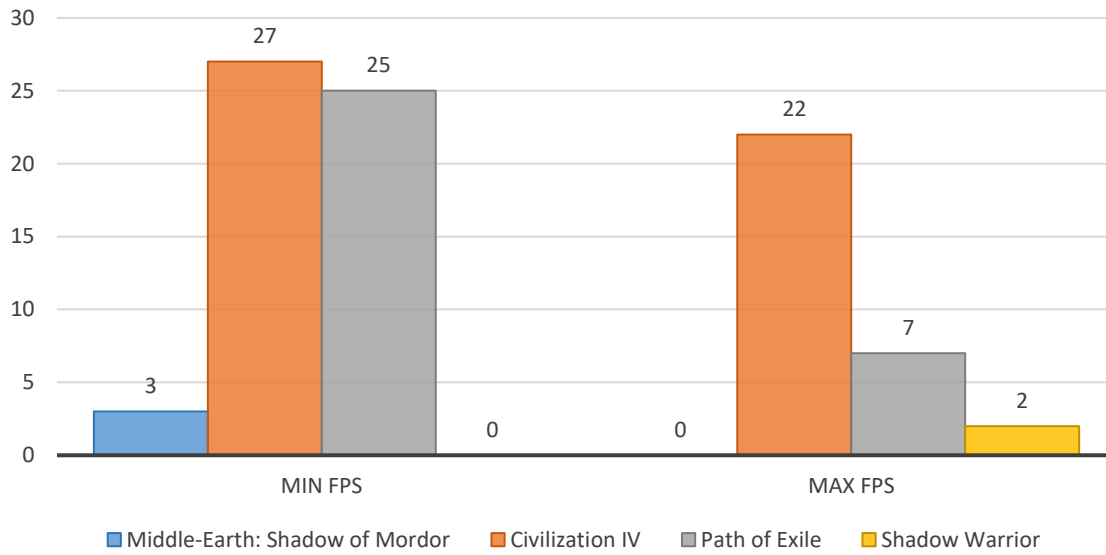
Anizotropno filtriranje



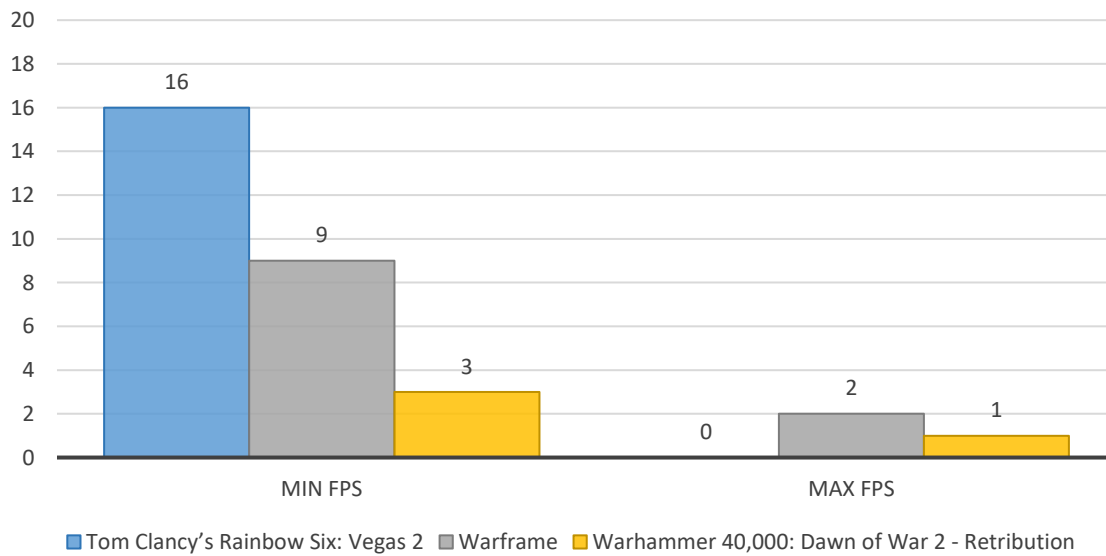
Izgladivanje rubova 1



Izглаđivanje rubova 2



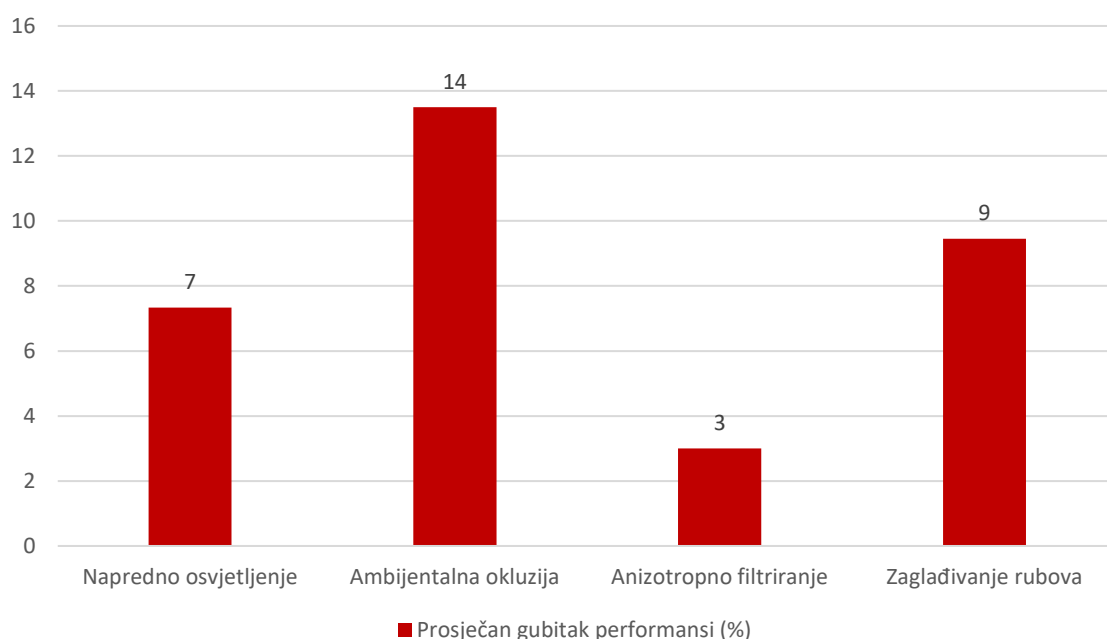
Izглаđivanje rubova 3



10. Analiza rezultata

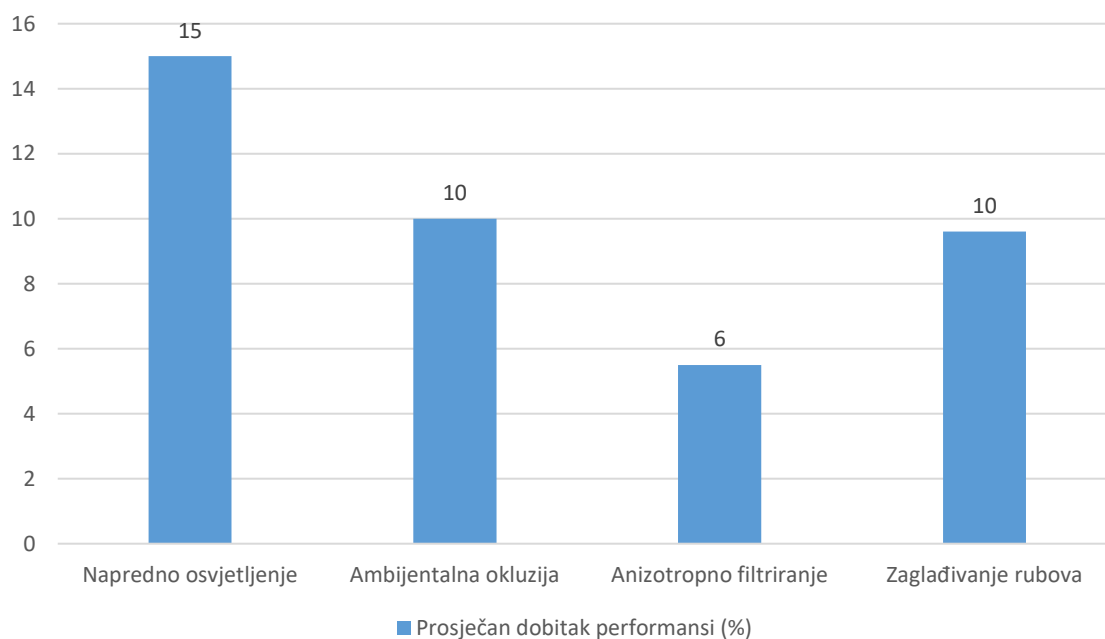
Prosječna razlika u brzini izvođenja između maksimalnih i minimalnih postavki unapređenja prikaza iznosi **58%**, što na testnom računalu iznosi **52 FPS**. Na svakom drugom računalu točan broj slika u sekundi varirati će ovisno o performansama računala, kod slabijih računala razlika će biti manja dok će kod snažnijih računala razlika biti proporcionalno veća. Bitno je naglasiti da se kod ovog testiranja nije mijenjala izlazna razlučivost slike, no mijenjala se razlučivost tekstura kod većine igara.

10.1. Gubici povećanjem zahtjeva



Analizom prosječnih gubitaka vidljivo je da najveći utjecaj na testnom setu igara ima podešavanje opcije ambijentalne okluzije. No ovaj rezultat ne govori dovoljno s obzirom da neke igre ne podržavaju mogućnost postavljanja ambijentalne okluzije. Također, ambijentalna okluzija ima velik utjecaj na igru Middle-Earth: Shadow of Mordor, čak 40%, što je mnogo više nego kod ostalih testiranih igara zbog toga što navedena igra u svom prostoru iscrtava vrlo veliki broj kompleksnih objekata na kojim iscrtava kompleksne sjene. Najveći i najkonzistentniji učinak kod većine ima zaglađivanje rubova, sve igre podržavaju ovu opciju i njegovo uključivanje u prosjeku usporava izvođenje za 9-10%

10.2. Dobitci smanjenjem zahtjeva



Sličan slučaj kao i kod prijašnjeg grafa događa se i kod izračunavanja prosječnog ubrzanja kod isključivanja pojedinih opcija. Napredno osvjetljenje u prosjeku povećava brzinu za 15%, no najveći utjecaj na navedeni broj ima DiRT: Showdown u čijim se scenama nalazi iznadprosječno velik broj izvora svjetla čiji se prikaz unapređuje uključivanjem ove opcije. Najkonzistentnije rezultate ponovo postiže opcija zaglađivanja rubova koja u prosjeku ubrzava izvođenje za 10%

11. Zaključak

Temeljna ideja iza ovog rada bila je na temeljit način pristupiti testiranju opcija koje razvojni studiji svojim krajnjim korisnicima omogućuju prilagođavanje igraćeg iskustva računalima koje posjeduju. Cilj svakog razvojnog studija je uvijek pružiti zamišljeno iskustvo što većem broju korisnika stoga je bitno da ih u tom cilju što manje sputavaju računalne performanse korisnika.

Raspon koji pojedini razvojni studio omogućuje svojim korisnicima testiran je kroz 11 različitih igara da bi se rezultati dobiveni u ovom testiranju mogu pouzdano očekivati i na svim drugim igrama koje podržavaju navedenu varijabilnost prikaza. Posebna pažnja kod testiranja pridodana je igranju u identičnim uvjetima s što je moguće sličnijim brojem objekata na ekranu, istim prostorima, brojem izvora svjetla i sl. u svrhu dobivanja konzistentnih i ponovljivih rezultata.

Iako je smanjenje razlučivosti, bilo cjelokupne slike ili samo tekstura objekata, najefikasniji način ubrzavanja izvođenja igre, zadovoljavajuće promjene moguće je postići i s naprednijim postavkama. Najveći utjecaj na performanse donosi zaglađenje rubova koji je u svojoj srži također vrsta povećanja broja piksela na ekranu no samo na rubovima objekata. Koju od naprednih postavki odabrati, ovisi o konkretnoj igri u pitanju. Primjerice, napredno osvjetljenje radi najveću razliku u igri *DiRT: Showdown* zbog velikog broja izvora svjetlosti na sceni dok u ostalim igrama u kojima su postavke svjetlosti dostupne ne radi veliku razliku.

Općenito, velik utjecaj na raspon između najviše i najniže brzine iscrtavanja ima cijena pojedine igre. Primjerice, besplatni naslovi poput *Warframe* i *Path of Exile* između najbržih i najsporijih postavki imaju oko 40 FPS dok ostali naslovi od kojih je većina koštala \$60 pri izlasku na tržište u Americi postižu najveću razliku od oko 20-30 FPS. Razlog tome je pretpostavka da igrači koji si mogu priuštiti igru u punoj cijeni također mogu i priuštiti odgovarajuće igraće računalo. Također, razvojni se studiji često sreću s vrlo tijesnim rokovima te im optimizacija nije toliko bitna u usporedbi sa stvaranje igre impresivnog grafičkog prikaza.

Neovisno o odabranoj opciji, mala je vjerojatnost da će bilo koja od njih od neigrive igre stvoriti kvalitetno igraće iskustvo, no uz pomoć ovih tehnika moguće je stvoriti ugodno iskustvo ukoliko igra radi na brzini od oko 25-30 FPS na način da dobivenih nekoliko FPS učini nagle padove u brzini izvođenja spomenute na početku ovog rada gotovo neprimjetnima.

U Varaždinu _____
Datum

Potpis

12. Literatura

- [1] Koroush Ghazi (travanj 2010.): The Gamer's Graphics & Display Settings Guide, dostupno na: www.tweakguides.com/Graphics_5.html
- [2] Fraps (veljača 2013.): Fraps, real time capture & benchmarking, dostupno na: www.fraps.com
- [3] Keith Stuart (veljača 2015.): Photorealism – the future of video game visuals, dostupno na: www.theguardian.com/technology/2015/feb/12/future-of-video-gaming-visuals-nvidia-rendering
- [4] Sophie Charara (lipanj 2016.): Explained: How does VR actually work?, dostupno na: www.wareable.com/vr/how-does-vr-work-explained
- [5] Matt Pharr, Simon Green (rujan 2007.): Ambient Occlusion, dostupno na: http://developer.nvidia.com/GPUGems/gpugems_ch17.html
- [6] The Physics Classroom: Specular vs. Diffuse Reflection, dostupno na: www.physicsclassroom.com/class/refln/Lesson-1/Specular-vs-Diffuse-Reflection
- [7] GeForce: Anisotropic Filtering, dostupno na: www.geforce.com/whats-new/guides/aa-af-guide#1
- [8] GeForce: Anti-aliasing, dostupno na: www.geforce.com/whats-new/guides/aa-af-guide#1
- [9] Whitson Gordon (siječanj 2014.): How Anti-Aliasing Smooths Out Your Games, and Which Type to Use, dostupno na: <http://lifelife.com/how-anti-aliasing-smooths-out-your-games-and-which-typ-1640944916>
- [10] Kevin Ohannessian (siječanj 2015.): Video game lighting effects bring games to life, dostupno na: <http://iq.intel.com/bringing-games-life-with-light/>
- [11] Alex Wawro (lipanj 2011.): Geek 101: What is V-Sync?, dostupno na: www.pcworld.com/article/229024/computers/geek101-vsnc.html
- [12] Learn OpenGL: Bloom, dostupno na: <http://learnopengl.com/#!Advanced-Lighting/Bloom>

13. Popis slika

- [1] Slika 2.1. Usporedba zaustavljene slike iz filma Alien vs. Predator i igre Alien vs. Predator 2, izvor: www.tweakguides.com/Graphics_5.html
- [2] Slika 3.1. Glavni lik igre Watch Dogs, izvor: www.theguardian.com/technology/2015/feb/12/future-of-video-gaming-visuals-vidia-rendering
- [3] Slika 3.2. Oculus Rift VR naočale, izvor: <http://www.wearable.com/vr/how-does-vr-work-explained>
- [4] Slika 4.1. Model osjenčan bez korištenja ambijentalne okluzije, izvor: http://developer.nvidia.com/GPUGems/gpugems_ch17.html
- [5] Slika 4.2. Model osjenčan uz korištenje ambijentalne okluzije, izvor: http://developer.nvidia.com/GPUGems/gpugems_ch17.html
- [6] Slika 4.3. Pojednostavnjen prikaz različitih vrsta refleksije
- [7] Slika 5.1. Usporedba različitih vrsta teksturnog filtriranja, izvor: www.geforce.com/whats-new/guides/aa-af-guide#1
- [8] Slika 6.1. Prikaz utjecaja metode izgladivanja rubova na piksel grafiku, izvor: www.geforce.com/whats-new/guides/aa-af-guide#2
- [9] Slika 7.1. Usporedni prikaz scene sa i bez korištenja naprednog osvjetljenja
- [10] Slika 7.2. Razlika u sceni sa i bez korištenja bloom efekta, izvor: <http://learnopengl.com/#!Advanced-Lighting/Bloom>
- [11] Slika 8.1. Prikaz lomljenja zaslona, izvor: www.eurogamer.net/articles/digitalfoundry-vanquish-face-off?page=2
- [12] Slika 9.1. Prikaz performansi igara izvođenih na grafičkoj kartici NVIDIA GeForce GTX 650, izvor: www.geforce.com/whats-new/articles/geforce-gtx-660-650-launch#1
- [13] Slika 9.1. Prikaz zaslona igre Dead Space
- [14] Slika 9.2. Prikaz zaslona igre DiRT: Showdown
- [15] Slika 9.3. Prikaz zaslona igre The Elder Scrolls V: Skyrim
- [16] Slika 9.4. Prikaz zaslona igre Left 4 Dead 2
- [17] Slika 9.5. Prikaz zaslona igre Middle-Earth: Shadow of Mordor
- [18] Slika 9.6. Prikaz zaslona igre Path of Exile
- [19] Slika 9.7. Prikaz zaslona igre Shadow Warrior
- [20] Slika 9.8. Prikaz zaslona igre Sid Meier's Civilization IV
- [21] Slika 9.9. Prikaz zaslona igre Tom Clancy's Rainbow Six: Vegas 2

[22] Slika 9.10. Prikaz zaslona igre Warframe

[23] Slika 9.11. Prikaz zaslona igre Warhammer 40,000: Dawn of War 2 - Retribution

14. Popis tablica

- [1] Tablica 9.1. Osnovni podaci o procesoru Intel Pentium G620, izvor:
http://ark.intel.com/products/53480/Intel-Pentium-Processor-G620-3M-Cache-2_60-GHz
- [2] Tablica 9.2. Osnovni podaci o grafičkoj kartici NVIDIA GeForce GTX 650, izvor:
www.geforce.com/whats-new/articles/geforce-gtx-660-650-launch#1
- [3] Tablica 9.3. Osnovne informacije o igri 1 - Dead Space
- [4] Tablica 9.4. Osnovne informacije o igri 2 - DiRT Showdown
- [5] Tablica 9.5. Osnovne informacije o igri 3 - The Elder Scrolls V: Skyrim
- [6] Tablica 9.6. Osnovne informacije o igri 4 - Left 4 Dead 2
- [7] Tablica 9.7. Osnovne informacije o igri 5 - Middle-Earth: Shadow of Mordor
- [8] Tablica 9.8. Osnovne informacije o igri 6 - Path of Exile
- [9] Tablica 9.9. Osnovne informacije o igri 7 - Shadow Warrior
- [10] Tablica 9.10. Osnovne informacije o igri 8 - Sid Meier's Civilization IV
- [11] Tablica 9.11. Osnovne informacije o igri 9 - Tom Clancy's Rainbow Six: Vegas 2
- [12] Tablica 9.12. Osnovne informacije o igri 10 - Warframe
- [13] Tablica 9.13. Osnovne informacije o igri 11 - Warhammer 40,000: Dawn of War 2 - Retribution