

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Nenad Mikša, Pavle Prentašić

Korekcija slike projektora u sustavima za popločenu  
vizualizaciju u stvarnom vremenu

Zagreb, 2010.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za elektroničke sustave i obradbu informacija Fakulteta elektrotehnike i računarstva pod vodstvom prof. dr. sc. Svena Lončarića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2009./2010.

## **Popis i pojašnjenje kratica**

CAD – Computer Aided Design

CUDA – Compute Unified Device Architecture

FPS – Frames Per Second

GPGPU – General Purpose computing on Graphics Processing Unit

LUT – Look Up Table

OpenGL – Open Graphics Library

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Opći i specifični ciljevi rada.....	2
2.1. Kalibracija projektor te njihova geometrijska korekcija.....	3
2.2. Sinkronizacija prikaza.....	4
3. Korekcija osvjetljenja na preklopu projekcija.....	5
3.1. Pretpostavke za korekciju osvjetljenja na preklopu projekcija.....	7
3.2. Korekcija osvjetljenja na preklopu projekcija.....	9
4. Linearizacija prijenosne karakteristike projektor.....	12
4.1. Mjerenje pomoću luxmetra.....	14
4.2. Mjerenje pomoću kamere.....	16
4.3. Izvedba korekcije.....	19
4.4. Korekcija svjetline u višeprojektorskom sustavu PanoVRama.....	20
4.5. Rezultati određivanja korekcijske funkcije.....	23
5. Priprema video zapisa za prikaz.....	27
5.1. Osnovni problemi izvedbe pripreme videozapisa.....	29
5.2. CUDA verzija.....	32
5.3. OpenGL verzija.....	34
6. PanoVRama – sustav za višeprojektorsku panoramsku vizualizaciju.....	36
7. Popis literature.....	37
8. Sažetak.....	39
9. Summary.....	40

### 1. Uvod

Živimo u vremenu naglog napretka tehnike i tehnologije. Nove tehnologije u znatnijoj mjeri utječu na naš život i to na raznim područjima, od zabave, primjene u znanosti kao i u svakodnevnim poslovima. Takvim razvojem pojavila se potreba za raznim vizualizacijama. Same vizualizacije mogu biti ostvarene na razne načine, a jedna od poznatijih i zanimljivijih vizualizacija je tkz. popločena (tiled) vizualizacija. Riječ je o sustavima koji se sastoje od više projektora ili računalnih zaslona povezanih u jednu cjelinu koja predstavlja jedan veliki neprekinuti zaslon. Takvi sustavi imaju mnogobrojne primjene, kao što su razne umjetničke vizualizacije, CAD aplikacije, kao i za razne oblike zabave. Uporaba projektora u popločenim vizualizacijama omogućuje dizajn velikih neprekinutih zaslona koji pružaju bolje iskustvo gledanja nego kod onih sustava vizualizacije koji koriste računalne zaslone.

Sustavi popločenih vizualizacija koji koriste projektore nastaju spajanjem više jeftinih projektora kako bi se dobila slika ili video visoke rezolucije. Jasno je da bi u takvim sustavim broj projektora mogao biti neograničeno velik što je jako velika prednost ovih vizualizacija u odnosu na neke konvencionalne, kao npr. posebno napravljene velike zaslone ili slično. Projekcije se mogu obavljati na razne oblike površina poput ravnih, cilindričnih, sfernih ili nekog drugog oblika koji omogućuje prikaz slike [4] .

## 2. Opći i specifični ciljevi rada

Da bi se napravio sustav za popločenu vizualizaciju potrebno je riješiti mnogobrojne probleme:

1. Kalibracija projektora te njihova geometrijska korekcija
2. Korekcija osvjetljenja
3. Priprema materijala za prikaz
4. Sinkronizacija prikaza

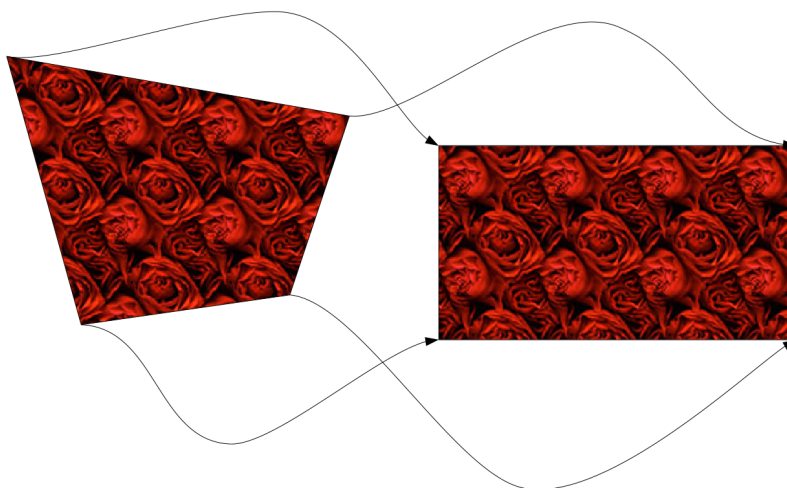
U ovom radu se koncentriramo na rješavanje problema korekcije osvjetljenja te pripreme materijala za prikaz. Važno je napomenuti da je rješavanje svakog problema jako bitno za rad cijelog sustava za vizualizaciji pa se u daljnjem tekstu prilikom objašnjavanja problematike korekcije osvjetljenja i pripreme materijala za prikaz koriste rezultati ostalih koraka podsustava za popločenu vizualizaciju.

### 2.1. Kalibracija projektora te njihova geometrijska korekcija

Kalibracija projektora te njihova geometrijska korekcija je početni korak u izradu sustava za popločenu vizualizaciju jer podaci dobiveni u ovom koraku su potrebni za ostale korake. Kalibracija projektora se provodi kako bismo dobili homografijsku matrice koja definira preslikavanje između ravnine projektora i ravnine projekcijske površine. Dvodimenzionalna homografija definira projektivnu transformaciju koja za svaku točku iz ravnine projektora definira korespondentnu točku u ravnini projekcijske površine. Samo preslikavanje se zorno vidi na slici 2.1.

Jasno je zašto nam je geometrijska korekcija bitna za popločene vizualizacije jer bez nje ne bismo mogli dobiti sliku koja je geometrijski korektna. Pojednostavljeno rečeno, geometrijski korektna je ona slika u kojoj su odnosi među elementima sačuvani i tijekom prikaza na projektorskoj površini. Ako se ne bi primjenjivala geometrijska korekcija slike bi se prilikom projekcije manje ili više deformirale, u ovisnosti o položaju samih projektora.

Osim same geometrijske korekcije, podaci dobiveni kalibracijom projektora se koriste i prilikom korekcije osvjetljenja te prilikom pripreme materijala za prikaz na projektorima.



Slika 2.1: Ilustracija geometrijske transformacije

### **2.2. Sinkronizacija prikaza**

Kako bi se video materijal prikazao na više projektor, potrebno je napraviti neki sustav koji će nam omogućiti da prikaz video zapisa bude sinkroniziran između projekcija. Za potrebe te svrhe moguće su različite konfiguracije spajanja projektor i računala pa je potrebno napraviti sustav efikasne sinkronizacije, koji ne ovisi o broju računala, projektor, te načinu njihovog spajanja. Jedna moguća implementacija je ona u kojoj su sva računala vremenski sinkronizirana, pa izvođač video zapisa na svakom računalu točno zna u kojem trenutku treba koju sličicu video zapisa prikazati. Takav sustav je neovisan o broju računala, kao i broju projektor spojenih na ista, jer svaki izvođač video zapisa neovisno o drugim izvođačima vrši ispravnu reprodukciju video zapisa.

Sustavi za vremensku sinkronizaciju već postoje te je moguće koristiti gotova rješenja, što čini ovo rješenje vrlo jednostavnim, ali k tome izuzetno efikasnim.

U ovom radu se nećemo baviti detaljima izvedbe sinkronizacije prikaza video zapisa. Detalji se mogu pronaći u [7] .



## 3. Korekcija osvjetljenja na preklopu projekcija

Kao što smo prije napomenuli u sustavima popločene vizualizacije postoji mnogo problema od kojih u ovom poglavlju opisujemo problem preklopa i korekcije osvjetljenja u tom području. Većina projektor koji se koriste u prikazu slike prilikom svog rada emitira svjetlost te u ovisnosti o sadržaju koje se prikazuje mi percipiramo sliku kao svjetliju ili tamniju. Među projektorima uvijek postoje razlike, pa se izlazne svjetline projektor jako razlikuju što u upotrebi projektor za popločene vizualizacije može biti veliki problem. Osim razlika u izlaznoj svjetlini među projektorima postoji i razlika u svjetlinama unutar jednog projektor. Taj efekt se najviše očituje u slabljenju intenziteta boje odmicanjem od središta projekcije prema rubovima što je posljedica čisto fizikalnih ograničenja jer točke na rubu projekcijske površine su udaljenije od izvora svjetlosti od točaka koja se nalaze u središtu projekcijske površine. Te razlike mogu biti jako izražene, pa tako izračena svjetlost na rubovima projekcijske površine može biti i 50 % manja od one u središtu projekcijske površine. Taj problem je detaljnije prikazan na slici 4.2.

Osim razlike u izlaznim svjetlinama koje pojedini projektor odašilje postoji i problem takozvanoga curenja svjetla. Taj problem se očituje u situacijama kada projektor projicira potpuno crnu sliku gdje bismo očekivali da nema nikakve emisije svjetla, ali nažalost ipak možemo vidjeti da projektor odašilje izvjesnu količinu svjetla pa imamo situaciju da svjetlost "curi" iako bismo mi željeli da u takvoj situaciji nema emisije svjetlosti.

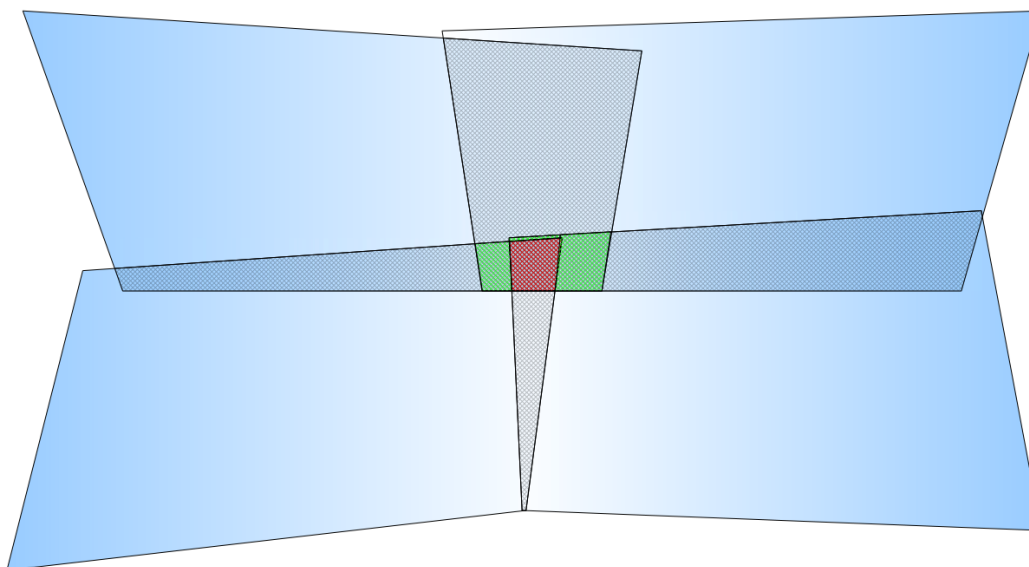
Osim svih dosad nabrojanih problema treba uzeti u obzir da se projektori, osim po svjetlini razlikuju i po boji koju reproduciraju. To znači, ako prikažemo neku boju, kao na primjer crvenu ne mora značiti da će ta boja jednako izgledati na svakom od projektor. Tu se uvodi pojam tzv. funkcije reprodukcije tona boja (Tone Reproduction Function). To je funkcija koja povezuje izlaznu boju, odnosno boju koja se stvarno prikazuje na projektoru i ulazne boje, odnosno boje koja je stvarno narinuta na ulaz projektor. Razlike među projektorima u pogledu tona boje mogu biti jako izražena jer ovise i o namjeni samog projektor. Sasvim je jasno da se projektori korišteni u kino projekcijskim dvoranama razlikuju od projektor koji se koriste prilikom nekih prezentacija. Svaki od njih je prilagođen za pojedinu uporabu pa i te razlike treba uzeti u obzir.

Sasvim je jasno da kad koristimo projektore za popločene vizualizacije postoji preklop

### 3. Korekcija osvjetljenja na preklopu projekcija

među projektorima. Taj preklop je potreban kako bismo dobili kontinuiranu sliku. Preklopi mogu biti različitih dimenzija i oblika te preklop ne mora nužno biti samo između dva projektora već između više projektora, kao što je prikazano na slici 3.1. Razlog zašto nas zanimaju preklopi je taj da u tim područjima imamo povećanu razinu svjetline u odnosu na područja koja nemaju preklopa. Osim toga, kao što smo već rekli, postoje slučajevi u kojima se preklop nalazi između više od dva projektora pa postoji doprinos više projektora. Osim toga problem nejednolike izlazne svjetlosne snage je jako bitan jer je doprinos svakog pojedinog projektora na svjetlinu preklopa u takvim slučajevima različit.

Jasno je da imamo problem za kojeg trebamo pronaći rješenje koje će obuhvatiti sve slučajeve i koje će uspješno nadomjestiti sve gore navedene nedostatke.



*Slika 3.1: Ilustracija preklapanja projekcija. Crvenom bojom je označeno područje preklopa četiriju projekcija, zelenom bojom područje preklopa triju projekcija, a tamnoplavom područje preklopa dviju projekcija*

#### 3.1. Pretpostavke za korekciju osvjetljenja na preklopu projekcija

Prije nego se uopće počne razmišljati o rješenju nekog problema potrebno je uvesti neke pretpostavke koje će nam biti polazište za rješavanje problema jer neki od mnogobrojnih navedenih problema nemaju tako značajan utjecaj na konačno rješenje jer uklanjanjem nekih nedostataka ne dolazi do perceptualnih promjena u kvaliteti naše slike. Tako je osnovni kriterij za kvalitetu provedene korekcije osvjetljenja subjektivni dojam gledatelja.

Mi u daljnjim razmatranjima pretpostavljamo sljedeće:

- 1) Projektori su međusobno uniformni, odnosno nema većih razlika među njima
- 2) Prijenosna funkcija svjetline projektora je linearna
- 3) Utjecaj opadanja svjetline na rubovima se zanemaruje
- 4) Preklopi mogu biti proizvoljnih oblika i dimenzija
- 5) Dopuštaju se preklopi između više projektora

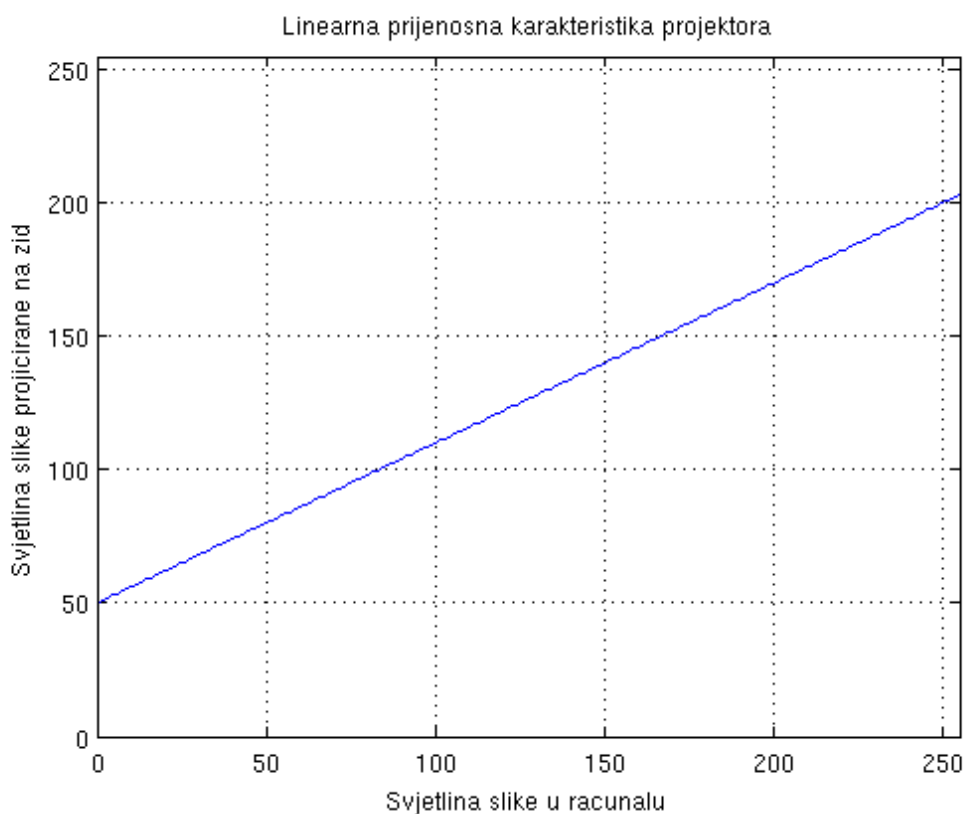
Moramo pojasniti zašto smo uveli takve pretpostavke. Pretpostavka da su projektori međusobno uniformni proizlazi iz činjenice da mi u našim mjerenjima koristimo projektore istog proizvođača i istog modela pa očekujemo da ne postoje značajnije razlike između njih.

Druga pretpostavka kaže da je prijenosna karakteristika svjetline projektora linearna. Drugim riječima, pretpostavlja se da je povećanje svjetline slike koju projektor projicira na zid proporcionalno povećanju svjetline slike u računalu. Preciznije rečeno, ako se za neki  $\Delta$  poveća svjetlina slike u računalu, svjetlina slike koju projektor prikazuje na zidu će se povećati za  $k\Delta$ , gdje je  $k$  realna konstanta.

Predložimo li takvu karakteristiku kao graf u koordinatnom sustavu gdje jedna koordinatna os predstavlja razinu svjetline slike u računalu, a druga razinu svjetline slike koju vidimo na zidu, rezultatni graf će biti pravac opisan jednadžbom (1).

$$I_{na\ zidu} = k \cdot I_{u\ racunalu} + I_0 \quad (1)$$

### 3.1. Pretpostavke za korekciju osvjetljenja na preklopu projekcija



Slika 3.2: Linearna (idealna) prijenosna karakteristika svjetline projektor

Primjer takvog grafa je prikazan na slici 3.2. Svjetlina slike je prikazana na rasponu od 0 do 255, što je uobičajeni raspon brojeva kojima se predstavlja svjetlina slike u računalu, no za prikaz prijenosne karakteristike projektor često se koristi i raspon od 0 do 1, što predstavlja relativni postotak svjetline u odnosu na unaprijed definirani maksimum.

To za posljedicu ima jednostavniju implementaciju korekcije osvjetljenja u preklopu jer je svjetlina u preklopu funkcija samo prostorne koordinate, a ne i svjetline u toj točki.

Treća pretpostavka je uvedena čisto na temelju subjektivnog promatranja slike projektor jer većina ljudi ne primijeti razliku u tome da je svjetlina u središtu projekcije veća nego na rubovima projekcije.

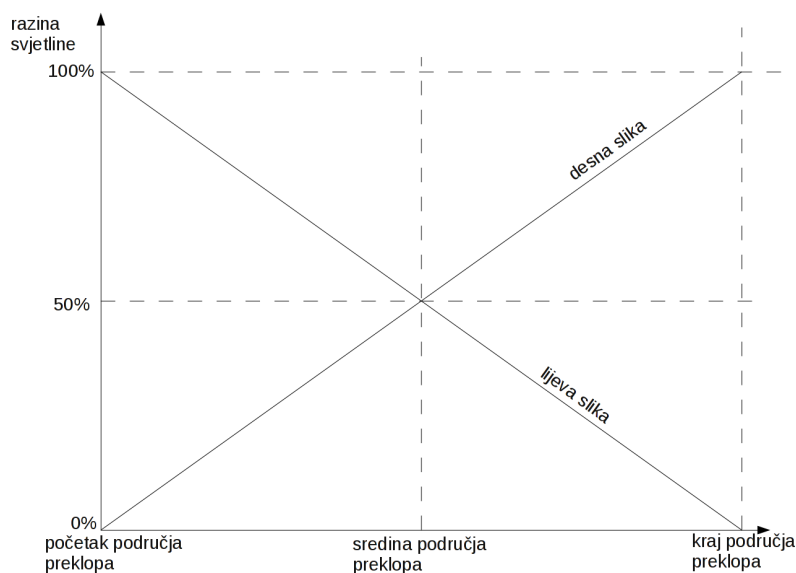
Prilikom rješavanja problema mi ne radimo nikakve pretpostavke o tome kakav preklop može biti niti koliko je taj preklop velik. Ta pretpostavka nam daje visoku razinu fleksibilnost prilikom projektiranja različitih popločenih vizualizacija. U našem modelu također pretpostavljamo također da su mogući preklopi između viših projektor što je jako bina pretpostavka koja još više povećava fleksibilnost našeg rješenja.

### 3.2. Korekcija osvjetljenja na preklopu projekcija

Rješenje ćemo na temeljiti na pretpostavkama izrečenim malo prije. Znači mi nastojimo područje u kojima se nalaze preklopi jednostavno učiniti takvim da se ne vidi da je to preklap, odnosno kad netko pogleda sliku vidi da je slika uniformna.

Postupak kojeg ćemo mi primijeniti je vrlo intuitivan jer nastojimo smanjiti doprinos svakog od projektora na svjetlinu u preklopu tako da ukupan doprinos bude jednak jediničnom doprinosu jednog projektora, odnosno da svjetlina na preklopu bude jednaka svjetlini koju bi dao jedan projektor koji projicira sliku samo na to područje. Kako se svaki od projektora koji projicira sliku na preklopu razlikuje od ostalih postavlja se pitanje koja je to ukupna svjetlina koja se mora projicirati u preklopu, odnosno koji je projektor referentan za određivanje jediničnog doprinosa. Referentni projektor se može izabrati na više načina, što uključuje da referentan projektor bude projektor koji ima najmanju razinu svjetline, ili opet da referentan projektor bude onaj projektor koji ima najveću razinu svjetline, ili možda možemo uzeti neki prosjek. Zadnja varijanta je da pretpostavimo da su projektori slični, odnosno da su im svjetline za sve boje približno iste.

Korekcija osvjetljenja na preklopu je napravljena slično kao što je prikazano na slici 3.3.



Slika 3.3: Kretanje svjetline dvaju projektora na preklopu projekcija

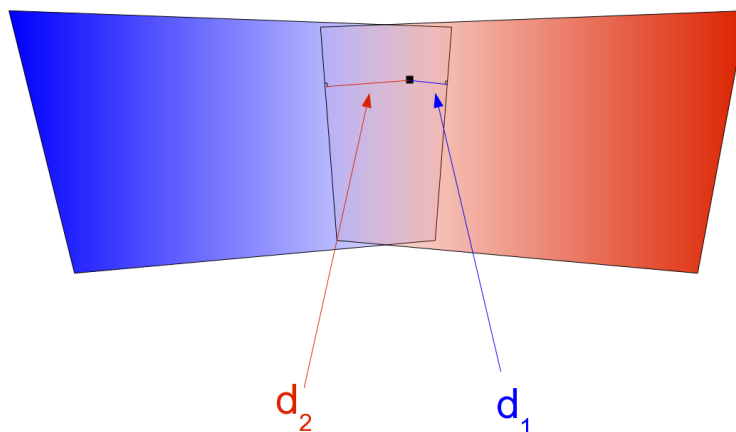
U daljnjem tekstu pretpostavljamo da je riječ o dva projektora, bez smanjenja općenitosti. Kao što je vidljivo na slici 3.3, razina svjetline lijevog projektora se na području

### 3.2. Korekcija osvjetljenja na preklopu projekcija

projekcije linearno smanjuje do nule, dok se na istom području razina svjetline desnog projektora linearno povećava do 100%. Valja uočiti da je u svakoj točki algebarski zbroj svjetlina projektora jednak 100%.

Prije je postavljeno pitanje referentnog projektora, no budući da smo pretpostavili uniformnost među projektorima, u ovom slučaju je problem određivanja referentnog projektora trivijalan.

Svjetlina piksela u nekoj točki preklopa lijevog projektora se računa kao omjer udaljenosti tog piksela do ruba slike lijevog projektora i ukupne udaljenosti tog piksela od rubova svih slika koje se u tom pikselu preklapaju.



Slika 3.4: Prikaz računanja svjetline piksela

Za detaljnije razumijevanje opisanog, valja pogledati sliku 3.4. Na slici možemo uočiti jedan piksel označen crnim kvadratićem za kojeg računamo svjetlinu u slikama za oba projektora. Izračunaju se udaljenosti tog piksela od oba ruba preklopa, koji su na slici označeni sa  $d_1$  i  $d_2$ .  $d_1$  predstavlja udaljenost piksela od bližeg ruba lijeve projekcije, što je u ovom slučaju udaljenost od desnog ruba preklopa lijeve projekcije.  $d_2$  predstavlja udaljenost piksela od bližeg ruba desne projekcije, što je u ovom slučaju udaljenost od lijevog ruba preklopa desne projekcije.

### 3.2. Korekcija osvjetljenja na preklopu projekcija

Svjetlina piksela slike za lijevi projektor se tada računa po formuli (2).

$$\alpha_1 = \frac{d_1}{d_1 + d_2} \quad (2)$$

Svjetlina piksela slike za desni projektor se istovremeno računa po formuli (3).

$$\alpha_2 = \frac{d_2}{d_1 + d_2} \quad (3)$$

Iz formula (2) i (3) je vidljivo da je algebarska suma svjetlina u svakom pikselu jednaka 1, odnosno 100% svjetline, što je pokazano u (4).

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \frac{d_1}{d_1 + d_2} + \frac{d_2}{d_1 + d_2} = \frac{d_1 + d_2}{d_1 + d_2} = 1 \quad (4)$$

Analogan postupak se može primijeniti i na slučaju piksela koji se nalazi u preklopu više projektoru.

Neka se piksel  $P$  nalazi u preklopu  $N$  projekcija. Svjetlina piksela slike za  $i$ -ti projektor se tada računa po formuli (5).

$$\alpha_i = \frac{d_i}{\sum_{j=1}^N d_j} \quad (5)$$



Slika 3.5: Izgled preklopa dviju projekcija nakon opisane korekcije osvjetljenja

### 4. Linearizacija prijenosne karakteristike projektor

Problem pretpostavke linearne prijenosne karakteristike svjetline projektor jest u tome što ta pretpostavka nije točna, kao što je vidljivo na slici 3.5, jer da je to istina, u preklopu se ne bi vidjela tamna vertikalna pruga.

Naime, ni jedan projektor nema linearnu prijenosnu karakteristiku svjetline. Čak i posebno kalibrirani profesionalni projektori, čija se cijena kreće iznad \$100 000, nemaju u potpunosti linearnu prijenosnu karakteristiku svjetline, no njihova je prijenosna karakteristika svjetline barem približno linearna i konzistentna među različitim projektorima istog modela. Međutim, za jeftine projektore dostupne u maloprodaji to nije slučaj. Prijenosna karakteristika svjetline takvih projektor je izuzetno nelinearna, te njen oblik varira čak i među različitim projektorima istog modela projektor istog proizvođača. Također veliki problem stvara i dotrajalost projektor. Starenjem, projektor može prikazivati sve manje raspone svjetline slike te mu se prijenosna karakteristika mijenja. Pritom ta promjena karakteristike nije linearna, nego se mogućnost vjernih prikaza nekih svjetlina više promijeni od mogućnosti prikaza nekih drugih svjetlina.

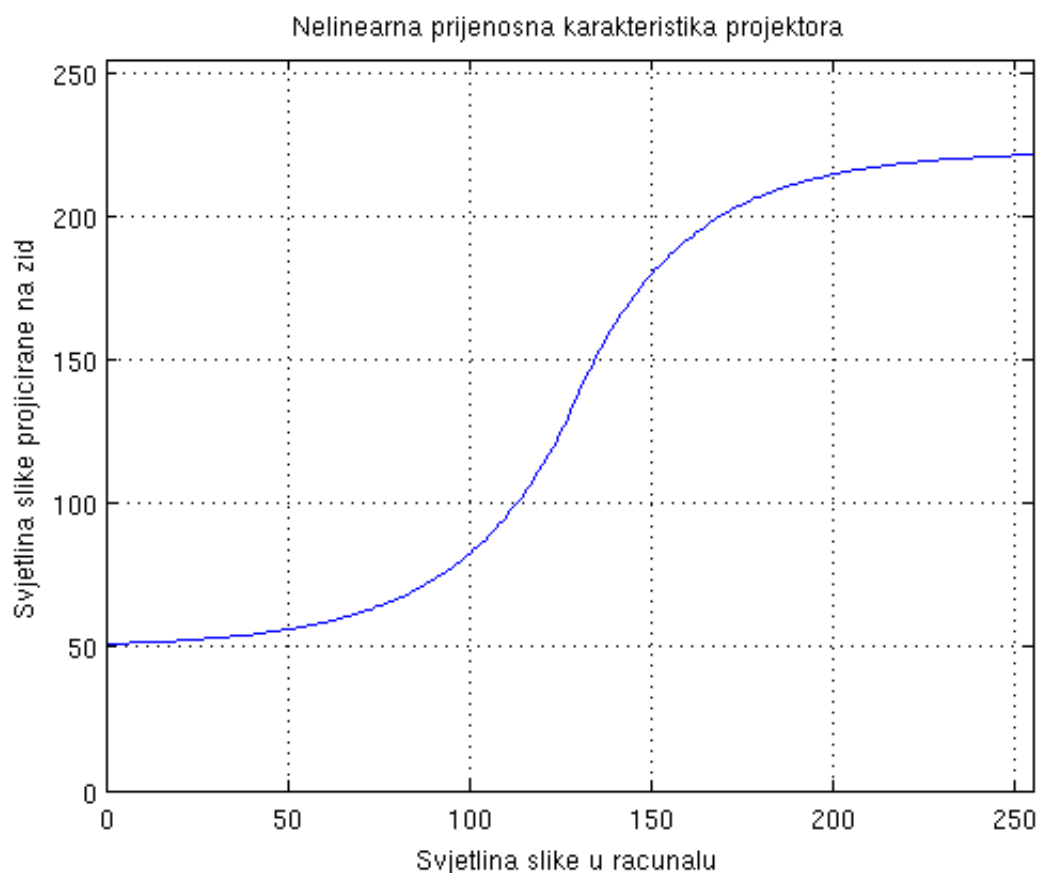
Primjer nelinearne prijenosne karakteristike projektor je prikazan na slici 4.1. Valja primijetiti da je najintenzivniji porast svjetline projektor na području oko 50% svjetline slike u računalu. Primjer sa slike 4.1. možemo smatrati reprezentativnim, budući da velika većina projektor ima sličnu nelinearnu prijenosnu karakteristiku svjetline, no takva prijenosna karakteristika nije pravilo.

Da bi se uspješno provela linearizacija prijenosne karakteristike svjetline projektor, potrebno je odrediti pravu (nelinearnu) prijenosnu karakteristiku svjetline projektor u analitičkom obliku, te na svaki piksel koji korigiramo sa maskom korekcije osvjetljenosti na preklopu djelovati inverznom funkcijom prijenosne karakteristike svjetline projektor prije same korekcije.

Preciznije rečeno, neka je  $\Phi(I)$  prijenosna karakteristika svjetline projektor, odnosno funkcija koja zadanoj svjetlini slike pridružuje konačnu svjetlinu projektirane slike na zidu. Nadalje, neka je  $I_0$  svjetlina piksela u slici u računalu kojeg zbog korigiranja treba pomnožiti sa faktorom maske  $\alpha$ . Konačna razina svjetline korigiranog piksela je tada dana izrazom (6).



#### 4. Linearizacija prijenosne karakteristike projektor



Slika 4.1: Nelinearna (stvarna) prijenosna karakteristika svjetline projektor

$$I = \Phi^{-1}(\alpha \cdot I_0) \quad (6)$$

Međutim, kao što je već navedeno, prijenosna karakteristika svjetline projektor nije ista čak ni kod projektor istog modela, te je zbog toga potrebno naći način na koji će se ta karakteristika moći dovoljno precizno odrediti.

Osnovna ideja procjene takve karakteristike leži u mjerenju vrijednosti funkcije u pojedinim točkama te interpolaciji funkcije temeljem izmjerenih uzoraka. Mjerenje se može provesti na više načina.

### 4.1. Mjerenje pomoću luxmetra

Prvi način uključuje posebne mjerne uređaje za mjerenje rasvjete, poput luxmetra. Luxmetar je mjerni uređaj koji mjeri razinu osvjetljenja neke površine. Mjerna jedinica za rasvjetu je lux. Neka površina je osvjetljena rasvjetom od 1 lux ako kroz 1 m<sup>2</sup> te površine prolazi svjetlosni tok od 1 lm [13].

Mjerenje se provodi na način da se u računalu izgenerira uniformna slika određene svjetline, te se ta slika projicira na zid. Zatim se u područje projekcije postavi luxmetar i očita količina rasvjete zida. Mjerenje se ponovi za svaku razinu svjetline slike u računalu više puta zbog eliminacije pogrešaka u mjerenju. Bitno je prilikom mjerenja osigurati nepomičnost projektora čija se karakteristika mjeri, isti položaj luxmetra na zidu i jednake svjetlosne uvjete u prostoriji u kojoj se vrši mjerenje.

Promjenjivi svjetlosni uvjeti u prostoriji u kojoj se vrši mjerenje mogu omesti mjerene veličine što će rezultirati pogrešno određenom prijenosnom karakteristikom projektora. Međutim, ako se svjetlosni uvjeti prostorije mijenjaju dovoljno polako, moguće je doskočiti tom problemu. Prije svakog mjerenja svjetline projekcije izmjeri se ambijentalna rasvjeta prostorije na mjestu projekcije s isključenim projektorom te se zatim izmjeri rasvjeta projektora na zadanoj svjetlini te se od izmjerene rasvjete oduzme rasvjeta ambijenta.

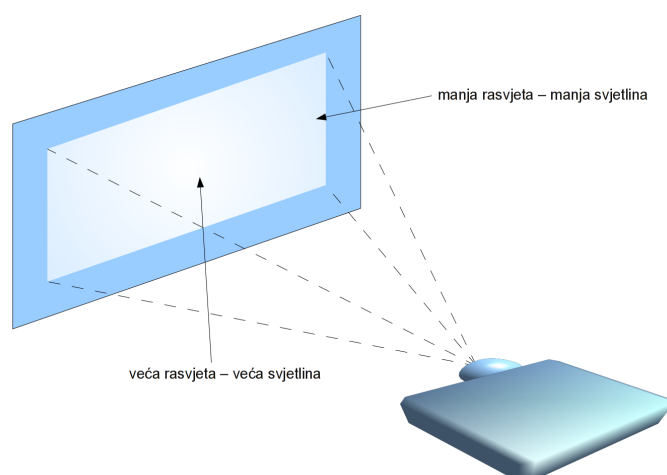
Nepomičnost projektora je nešto manje zahtjevan uvjet mjerenja, no odnosi se na to da se prilikom mjerenja projektor ne udalji ili približi zidu. Takav pomak bi rezultirao povećanjem ili smanjenjem površine projekcije na zidu, a to bi promijenilo rasvjetu zida (koju zapravo i mjerimo) jer bi isti svjetlosni tok prolazio kroz drugačiju površinu.

Isti položaj luxmetra na zidu je vrlo važan uvjet mjerenja. Naime, zbog različitog kuta upada svjetlosnih zraka na područje projekcije, područje bliže sredini projekcije ima veću rasvjetu, te time i veću svjetlinu, jer zrake svjetlosti padaju gotovo okomito na to područje projekcije, dok područja bliže rubovima projekcije imaju manju rasvjetu i manju svjetlinu slike zbog toga što zrake svjetlosti padaju pod određenim kutom u ta područja projekcije.

Na slici 4.2. je prikazana ta pojava. Valja naglasiti da je ta pojava karakteristična uglavnom samo za jeftinije projektore, jer skuplji projektori posebnim lećama osiguravaju paralelizam zraka svjetlosti koje padaju na projekcijski zid, a u najgorem slučaju prostornu nejednolikost svjetline projicirane slike drže unutar granica koje ljudsko oko ne zamjećuje.

## 4.1. Mjerenje pomoću luxmetra

Međutim, prilikom određivanja prijenosne karakteristike svjetline jeftinog projektora, potrebno je uzeti u obzir prostornu nejednolikost svjetline slike. To znači da je potrebno odrediti prijenosnu karakteristiku svjetline projektora za svaki piksel slike. Da bi se stvar pojednostavnila, prijenosna karakteristika svjetline projektora se može definirati kao funkcija triju varijabli – dvije varijable određuju koordinatu piksela, a treća razinu svjetline tog piksela. Budući da svaka slika može biti proizvoljnih dimenzija, poželjno je normalizirati koordinate piksela te slike na interval  $[0, 1]$ , kako ne bi bilo potrebe definirati prijenosnu karakteristiku svjetline projektora za svaku moguću dimenziju slike. Tada se prijenosna karakteristika svjetline projektora može definirati kao preslikavanje  $\Phi_1: [0, 1] \times [0, 1] \times B \rightarrow L$ .  $B$  predstavlja domenu razina svjetlina te je najčešće diskretna iz intervala  $[0, 255]$ , no to ne mora biti slučaj.  $L$  je kontinuirana kodomena izmjerenih vrijednosti rasvjete u pojedinim položajima na projekciji. Vrijednost rasvjete se najčešće iskazuje u luxima.



Slika 4.2: Prostorno nejednolika svjetlina projektirane slike

Ovako određena prijenosna karakteristika je vrlo točna, no za potrebe korekcije svjetline na preklopu dviju projektora u višeprojektorskoj vizualizaciji poprilično nepraktična. Naime, inverzna funkcija prijenosne karakteristike će za parametar tražiti vrijednost svjetline u luxima, dok je za praktične potrebe korekcije svjetline na preklopu dviju projektora prema jednadžbi (6) zgodnije imati inverznu funkciju koja kao parametar prima razinu svjetline piksela slike u računalu. Zbog toga je potrebno pronaći način pretvorbe izmjerenih vrijednosti rasvjete u domenu  $[0, 255]$  razine svjetlina piksela u računalu.

### 4.2. Mjerenje pomoću kamere

Zbog tog razloga moguće je osmisлити drugačiji način određivanja prijenosne karakteristike svjetline projektora. Taj način umjesto luxmetra za određivanje svjetline projekcije koristi kameru. Mjerenje se vrši tako da se u računalu izgenerira uniformna slika određene svjetline te se ta slika projicira na zid. Zatim se područje projekcije fotografira kamerom. Dobivenu fotografiju je potrebno geometrijski transformirati u područje slike u računalu. Za potrebe te transformacije potrebno je poznavati transformacijsku matricu preslikavanja slika u računalu u slike na zidu, odnosno njen inverz. Takva matrica se može izračunati posebnim kalibracijskim postupcima koji ovdje neće biti objašnjeni. Nakon takve transformacije izmjerena slika svjetlina i originalna slika u računalu su geometrijski ekvivalentne, odnosno odnos piksela je 1:1. Dakle potrebno je usporediti svaki piksel originalne slike sa njemu odgovarajućim pikselom izmjerene slike. To se ponovi za sve moguće svjetline piksela izvorne slike nad diskretnim skupom  $[0, 255]$ . Tada se za svaki piksel slike interpolacijom dobije prijenosna karakteristika svjetline danog piksela projektora. Spajanjem svih takvih funkcija za svaki piksel dobivamo prijenosnu karakteristiku svjetline projektora kao preslikavanje  $\Phi_2: X \times Y \times [0, 255] \rightarrow [0, 255]$ . Skupovi  $[0, 255]$  su diskretni i predstavljaju razine svjetlina piksela koje se mogu predstaviti u računalu. Skupovi  $X$  i  $Y$  su također diskretni, a predstavljaju horizontalnu, odnosno vertikalnu rezoluciju slike pomoću koje se mjeri prijenosna karakteristika projektora.

Valja uočiti da je ovako izmjerena prijenosna karakteristika svjetline projektora manje precizno određena od prijenosne karakteristike određene na način koji je prvo opisan. U idealnom slučaju se prijenosna karakteristika  $\Phi_2$  može smatrati otipkanom verzijom karakteristike  $\Phi_1$ . U slučaju prostorne rezolucije, otipkavanje ne predstavlja prevelik problem, ukoliko je stopa uzorkovanja dovoljno velika. Najpreciznija karakteristika se dobiva korištenjem slika koje su maksimalne rezolucije koju projektor može prikazati. Korištenje slika veće rezolucije od spomenute neće doprinijeti preciznosti određivanja prijenosne karakteristike, budući da će se dva ili više piksela originalne slike spojiti u jedan piksel na projekciji.

Diskretna domena svjetline slike ne predstavlja problem, budući da su ionako sve slike u

računalu diskretizirane i njihove svjetline su predstavljene sa 8 bita po pikselu, odnosno moguće je definirati 256 različitih razina svjetline piksela. Upravo zbog toga je za domenu razina svjetlina piksela u definiciji prijenosne karakteristike uzet diskretan interval [0, 255].

Najveći problem ovakve definicije prijenosne karakteristike predstavlja diskretna kodomena. Iako je takva kodomena pogodna za implementaciju korekcije svjetline u višeprojektorskom sustavu vizualizacije prema jednadžbi (6), problem predstavlja to što kamera s kojom je vršeno mjerenje također ima svoju nelinearnu prijenosnu karakteristiku. Iako takva karakteristika ne predstavlja prevelik problem mjerenju, zbog toga što većina kamera pokušava imati takvu prijenosnu karakteristiku da čim točnije oponaša ljudski vizualni sustav, glavni problem predstavlja nemogućnost kamere da se prilagođava dinamičkim svjetlosnim uvjetima. Na primjer, ljudskom oku bijeli papir izgleda bijelo i u uvjetima slabog osvjetljenja i u uvjetima jakog osvjetljenja, no za kameru to ne vrijedi. Zbog toga je moguće da neke vrlo različite razine osvjetljenja kamera „vidi” kao istu razinu osvjetljenja, zbog odlaska u zasićenje. Takva pojava definitivno smanjuje kvalitetu mjernih rezultata. Međutim, takav način mjerenja prijenosne karakteristike svjetline projektora je puno praktičniji zbog toga što ga je moguće automatizirati, ukoliko se koristi kamera kojom je moguće upravljati pomoću računala. Moguće je napisati program koji iterativno generira slike različitih svjetlina, projicira ih, kamerom fotografira projekciju, te usporedbom fotografije i originala određuje prijenosnu karakteristiku svjetline projektora. Metoda uistinu jest manje precizna od metode koja je navedena prva, no za potrebe korekcije svjetline projektora u području preklapanja projekcija u višeprojektorskim sustavima vizualizacije jest dovoljno dobra, budući da je pogreška korekcije u većini slučajeva manja nego što ljudsko oko može zamijetiti.

Također prilikom mjerenja pomoću kamere dolazi do greške u mjerenju jer rezultatna izmjerena svjetlina piksela na fotografiji projekcije ovisi o više parametara, poput ambijentalnog osvjetljenja okoline zida na kojeg se vrši projekcija, vremena ekspozicije kamere, itd. Nadalje, kamera također ima svoju prijenosnu karakteristiku svjetline koju valja uzeti u obzir prilikom mjerenja.

Problem na ovaj način određenih prijenosnih karakteristika je u tome što su definirane za svaki piksel posebno, te ih zbog toga ne možemo koristiti kao u jednadžbi (6). Jednadžba (6) očekuje prijenosnu karakteristiku kao preslikavanje svjetline u svjetlinu, bez

## 4.2. Mjerenje pomoću kamere

informacije o poziciji piksela. Ako malo bolje pogledamo, primjećujemo da za fiksno definirani piksel  $(x, y)$  možemo definirati prijenosnu karakteristiku svjetline iz karakteristike  $\Phi_2$  na način opisan jednažbom (7).

$$\Phi(I) = \Phi_2(x, y, I) \quad (7)$$

Tako definiranoj prijenosnoj karakteristici možemo naći inverz koji tada možemo koristiti u jednažbi (6). Štoviše, možemo definirati novu inverznu prijenosnu karakteristiku kao preslikavanje  $\Phi_2^{-1}: X \times Y \times [0, 255] \rightarrow [0, 255]$ , koja za svaki piksel definira inverznu prijenosnu karakteristiku projektora. U tom slučaju, ako nam je  $A$  korekcijska maska svjetline slike zbog potreba korekcije u području preklapanja više projekcija i ako je ta maska iste rezolucije kao i slika koju korigiramo, tada je vrijednost svjetline korigiranog piksela  $(x, y)$  dana izrazom (8).

$$I_{xy} = \Phi^{-1}(x, y, A[x, y] \cdot I_{xy0}) \quad (8)$$

Jednažba (8) je zapravo općeniti oblik jednažbe (6), jer uzima u obzir prostornu nejednolikost svjetline projekcije.

Ova metoda je slična metodi opisanoj u [1], [11] i [12].

### 4.3. Izvedba korekcije

Jednadžba (8) daje dovoljno točnu linearizaciju prijenosne karakteristike svjetline projektoru za potrebe korekcije svjetline na području preklapanja više projektoru u višeprojektorskim vizualizacijskim sustavima. Međutim, takvi sustavi često trebaju korekciju svjetline slike raditi u stvarnom vremenu, zajedno s izrezivanjem slike za svaki projektor posebno. Evaluacija inverzne prijenosne funkcije svjetline projektoru se mora ubrzati kako bi se za istu trošilo minimalno vrijeme. Direktna primjena jednadžbe (8) nije računalno optimalna, odnosno ukoliko je inverzna prijenosna karakteristika svjetline projektoru dana u analitičkom obliku, evaluacija funkcije za svaki piksel svakog okvira videa je vrlo neoptimalna. Eventualno bolje rješenje se može potražiti u evaluaciji funkcije za svaku moguću vrijednost svjetline svakog piksela te pohranjivanju tih vrijednosti u tzv. Look-Up tablicu (LUT). Takva LUT će biti trodimenzionalna struktura u memoriji, te je potencijalna mana takvog pristupa veće zauzeće memorije. Međutim, budući da je memorija u većini slučajeva jeftinija od brzih procesora, takav pristup se vrlo često koristi. U tom slučaju, umjesto jednadžbe (8) možemo pisati jednadžbu (9).

$$I_{xy} = LUT(x, y, A[x, y] \cdot I_{xy0}) \quad (9)$$

Primijetimo da je jednadžba (9) zapravo istog oblika kao i jednadžba (8), s razlikom da se inverzna funkcija prijenosne karakteristike svjetline projektoru ne evaluira svaki put, nego se iz tablice unaprijed izračunatih vrijednosti čitaju gotove vrijednosti funkcije. Prednost takvog pristupa, kao što je već rečeno, leži u njegovoj brzini izvođenja u slučajevima gdje je brzina ključna. Mana takvog pristupa je što unosi dodatnu nepreciznost određivanja korigirane svjetline piksela. Uzevši u obzir da je prijenosna karakteristika  $\Phi_2$  već bila određene s manjom preciznosti od prijenosne karakteristike  $\Phi_1$ , dodatno unošenje nepreciznosti može dodatno narušiti kvalitetu izvedbe sustava za višeprojektorsku vizualizaciju.

### 4.4. Korekcija svjetline u višeprojektorskom sustavu PanoVRama

U višeprojektorskom sustavu za panoramsku vizualizaciju PanoVRama, razvijenom na Fakultetu Elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, korekcija svjetline preklopa dviju projekcija je izvedena na malo drugačiji način od prethodno opisanog. U tom sustavu jedno računalo pogoni dva projektora, te je zbog toga nužna velika brzina rada algoritama za korekciju svjetline i rezanja slike za svaki projektor posebno jer se zahtjeva rad u stvarnom vremenu. Iz tog razloga korekcija svjetline po jednadžbi (8) nije moguća, zbog toga što je inverzna prijenosna karakteristika projektora u analitičkom obliku preintenzivna za računanje dovoljnom brzinom za prikaz videa u stvarnom vremenu. Rješenje problema je pronađeno u traženju korekcijske maske  $A$  koja je takva da već u sebi sadrži koeficijente koji određene razine svjetline piksela preslikava u korigirane razine svjetline piksela, kao da je na njih djelovano inverznom prijenosnom karakteristikom svjetline projektora. U tom slučaju se korekcija svjetline svakog piksela jednostavno svodi na izraz (10).

$$I_{xy} = A[x, y] \cdot I_{xy0} \quad (10)$$

Operacija množenja je brza i može se izvoditi za svaki piksel u stvarnom vremenu pri prikazu videa. Mana takvog pristupa jest u tome što je daleko najlošiji od svih dosad spomenutih – greške korekcije su vidljive i ljudskom oku. Međutim, u slučajevima video projekcije sa 6 ili više projektor, očekuje se gledanje videa iz relativno velike daljine, budući da je područje projekcije vrlo široko. Srećom, iz takvih udaljenosti, greške korekcije svjetline nisu vidljive, te se takav kompromis može uzeti u obzir.

Ideja takve korekcije jest pronaći funkciju korekcije za korekcijsku masku za svaku moguću razinu korekcije. Zatim se korekcijska maska korigira pomoću te funkcije. Najlakši oblik korekcijske funkcije je funkcija s čijom vrijednošću množimo pojedine elemente korekcijske maske, kako bismo dobili korigiranu korekcijsku masku.

$$A_{korigirano}[x, y] = A[x, y] \cdot \Psi(A[x, y]) \quad (11)$$

Jednadžba (11) prikazuje način na koji se želi koristiti korekcijska funkcija. Potrebno je,



#### 4.4. Korekcija svjetline u višeprojektorskom sustavu PanoVRama

dakle, odrediti funkciju korekcije  $\Psi$ .

Funkciju  $\Psi$  određujemo sličnom metodom kao i prijenosnu karakteristiku  $\Phi_2$ . Razlika je samo u tome da kamera mora snimati područje preklapanja dviju projektor, ali na slici trebaju biti vidljivi i dijelovi projekcija koji se ne preklapaju. Određivanje funkcije kreće tako da se najprije u računalu izgenerira uniformna slika maksimalne svjetline te se ista projicira na oba projektor. Takva projekcija se fotografira kako bi se odredila područja preklapanja na fotografiji za daljnje korištenje. Takvo određivanje se može raditi automatski, ili se fotografija može prikazati korisniku, koji onda na slici označi područje preklapanja. Nakon toga se u računalu izgeneriraju dvije slike: jedna za lijevi projektor, a druga za desni. Slika za lijevi projektor je uniformna i maksimalne svjetline na području na kojem se slika neće preklapati sa drugim projektorom. Na području preklopa slika također mora biti uniformna, iste boje kao i na ostatku slike, ali razine svjetline za koju mjerimo vrijednost funkcije  $\Psi$ . Slika za desni projektor je isto uniformna, iste boje kao i slika za lijevi projektor, te maksimalne svjetline na području na kojem se slika neće preklapati s drugim projektorom. Na području preklopa, desna slika također mora biti uniformna, iste boje kao i na ostatku slike, ali razine svjetline komplementarne od razine svjetline lijeve slike na području preklapanja. Na primjer, ako tražimo vrijednost funkcije za razinu svjetline od 0.1 (10% maksimalne svjetline), tada ćemo izgenerirati sliku za lijevi projektor koja će u području preklopa imati razinu svjetline piksela na 10% maksimalne svjetline, dok će u području izvan preklopa imati razinu svjetline piksela na maksimalnoj razini. S druge strane, slika za desni projektor će nam u području preklopa imati razinu svjetline piksela na 90% maksimalne razine, a izvan područja preklopa će imati razinu svjetline piksela na maksimalnoj razini. Primijetimo da je u području preklopa algebarski zbroj razina svjetline 100%. Međutim, zbog nelinearne prijenosne karakteristike svjetline projektor, područje preklopa će biti nešto tamnije ili svjetlije od okoline. Ideja je tada u više iteracija pronaći konstantu s kojom je potrebno pomnožiti razinu svjetline lijevog projektor, kako bi područje preklopa bilo jednake svjetline kao i okolno područje. Metoda je u potpunosti automatska – računalni program izgenerira navedene slike po navedenom pravilu, projicira ih, te kamerom fotografira projekciju. Konstantu koju traži program postavi na 1. Zatim, znajući na fotografiji pronaći područje preklopa i područja izvan preklopa koji su određeni u prvom koraku, usporedi prosječnu svjetlinu područja preklopa s prosječnom svjetlinom područja izvan preklopa. Ako je područje preklopa svjetlije od okoline, program smanji

#### **4.4. Korekcija svjetline u višeprojektorskom sustavu PanoVRama**

konstantu, te ponovo izgenerira lijevu sliku, ali sada tako da razinu svjetline područja preklopa pomnoži sa trenutnom vrijednošću korekcijske konstante. Desna slika se ne dira. Ako je područje preklopa tamnije od okoline, program poveća konstantu, te čini kako je prethodno opisano. Zatim se ponovno fotografira projekcija tako korigirane slike i stvar se ponavlja tako dugo dok prosječna svjetlina preklopa nije jednaka prosječnoj svjetlini okoline. Kad se to dogodi, pronađena korekcijska konstanta se tretira kao vrijednost funkcije  $\Psi$  za danu razinu svjetline.

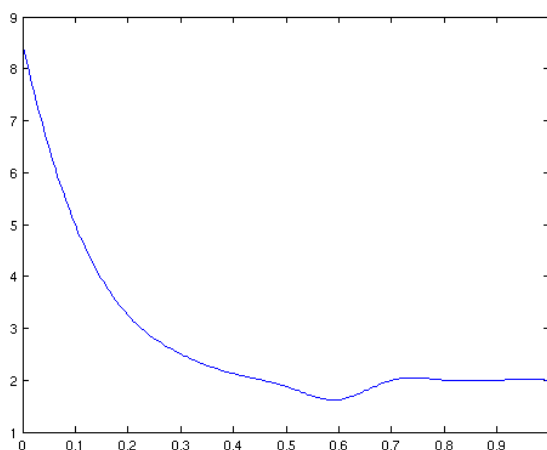
Na taj način se odrede vrijednosti funkcije  $\Psi$  u više točaka te se zatim funkcija interpolira i otipka u 256 ravnomjerno raspoređenih točaka. Tako otipkana funkcija se sprema u obliku LUT-a i koristi za brzo korigiranje korekcijske maske pomoću jednadžbe (11) prilikom njenog izračunavanja.

Prilikom određivanja funkcije  $\Psi$  moguće je zamijeniti uloge lijevog i desnog projektora – bitno je samo da se svjetlina jednog projektora drži konstantnom. Također valja uočiti da se funkcija korekcije na preklopu određuje samo za jedan projektor (u našem slučaju lijevi), dok se svjetlina drugog projektora ne korigira.

Valja uočiti nedostatke ovog načina korekcije svjetline. Osim dosad spomenutih nepreciznosti u određivanju, metoda ne uzima u obzir prostorno nejednoliku svjetlinu projekcije. Međutim, prostorna nejednolikost svjetline projektora koji su korišteni za mjerenje je bila zanemarivo mala, pa se ta pojava zanemarila zbog jednostavnosti izvedbe korekcije svjetline. Također valja primijetiti da traženjem prosjeka svjetlina ne uzimamo u obzir prijenosne karakteristike svjetlina projektora u svakom njegovom pikselu, nego pretpostavljamo istu karakteristiku po cijelom području projekcije, što je naravno krivo, zahvaljujući efektu prostorno nejednolike svjetline projekcije skiciranom na slici 4.2.

### 4.5. Rezultati određivanja korekcijske funkcije

Kao što je prethodno navedeno, prilikom određivanja funkcije  $\Psi$  potrebno je generirati uniformne slike jednakih boja. Budući da se mjere svjetline, logičan je izbor korištenja bijele boje.



Slika 4.3: Funkcija  $\Psi$  za projektor mjerena pomoću bijele boje

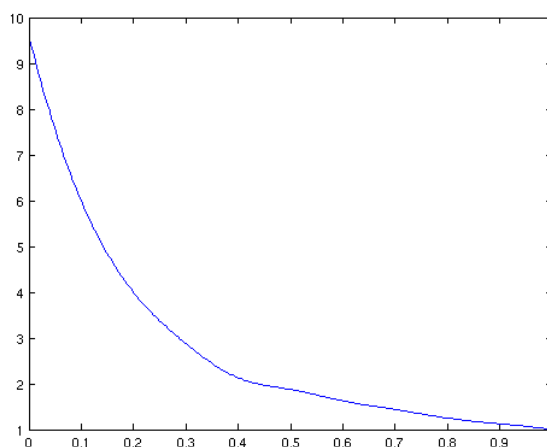
Slika 4.3 prikazuje interpoliranu funkciju  $\Psi$  mjerenu pomoću bijele boje. Mjerenja su provedena za 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% i 90% maksimalne svjetline projektor, a vrijednosti između su interpolirane kubičnim spline interpolatorom. Kao što je vidljivo sa slike 4.3, funkcija  $\Psi$  ima oblik padajuće eksponencijale, s malim odmakom na 70% razine svjetline. Problem toga je pogreška u mjerenju na visokim razinama svjetline, što se onda u korigiranom preklopu manifestira putem tamnih ili svijetlih pruga, koje su oku vrlo neugodne.

Budući da se svaka boja može dobiti miješanjem triju osnovnih boja: crvene, zelene i plave, mjerenje je bilo provedeno i pomoću svake od tri navedene boje. Slike 4.4, 4.5 i 4.6 prikazuju interpolirane funkcije  $\Psi$  mjerene pomoću svake od navedenih boja. Pokušajem korištenja posebne korekcijske funkcije za svaki kanal slike posebno, utvrđeno je da se neke boje u području preklopa prenaglašavaju, dok se druge nedovoljno ističu. To nas dovodi do zaključka da bi korekcijske funkcije za sva tri kanala trebale biti jednake, jer u

## 4.5. Rezultati određivanja korekcijske funkcije

suprotnosti nemamo korekciju svjetline, nego „korekciju” boje, koja zapravo uništava izvornu sliku. Budući da korekcijska funkcija izmjerena pomoću bijele boje nije davala zadovoljavajući rezultat, pokušane su korekcije sva tri kanala slike pomoću korekcijskih funkcija određenih za svaku boju posebno. Ako se koristi korekcijska funkcija određena pomoću zelene boje za sva tri kanala slike, područje preklopa je svjetlije od okoline, a još k tome sadrži i lagane svijetle pruge. To se može objasniti „valićima” grafa funkcije sa slike 4.5 na 30%, 50% i 80% maksimalne svjetline projektora.

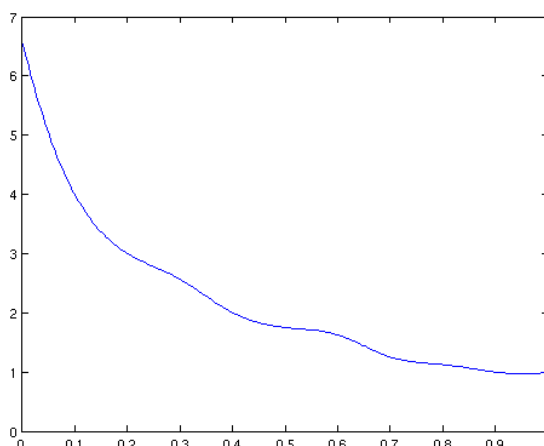
Korištenje korekcijske funkcije određene pomoću plave boje daje najlošije rezultate – na području preklopa postoje svijetle i tamne pruge, kao što je i uočljivo iz grafa funkcije na slici 4.6.



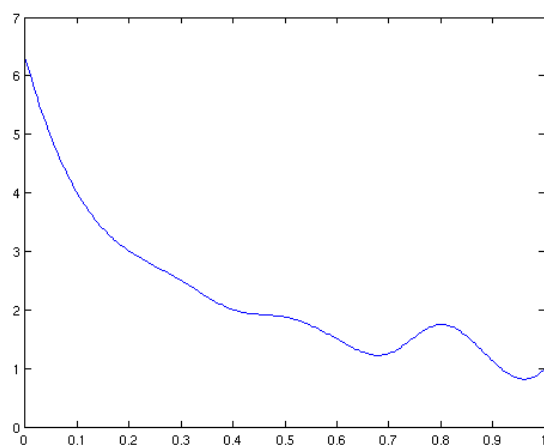
Slika 4.4: Funkcija  $\Psi$  za projektor mjerena pomoću crvene boje

Međutim, ako se koristi korekcijska funkcija izmjerena pomoću crvene boje, u području preklopa nema vidljivih artefakata te slika izgleda uniformno osvjetljena po cijelom svom području. Ovakav rezultat nam govori da je mjerenje pomoću kamere najtočnije pri visokim valnim duljinama svjetlosti, u koje spada i crvena boja. Naime, korekcijske funkcije za zelenu i plavu boju su pogrešno određene upravo zbog slabije osjetljivosti kamere na svjetlinu tih boja. Slično vrijedi i za bijelu boju, budući da se ona sastoji od svih triju komponenata.

## 4.5. Rezultati određivanja korekcijske funkcije



Slika 4.5: Funkcija  $\Psi$  za projektor mjerena pomoću zelene boje



Slika 4.6: Funkcija  $\Psi$  za projektor mjerena pomoću plave boje

Najbolja osjetljivost kamere na svjetlinu crvene boju je zapravo i logična, budući da je većina materijala od kojih se proizvode tranzistori i diode fotosjetljiva na infracrveno svjetlo. Senzori kamere za crvenu boju se proizvode od sličnih materijala, s razlikom da je fotosjetljivost pomaknuta na kraće valne duljine, tako da zahvaća i crvenu svjetlost. Takvi senzori su nerijetko osjetljivi i na infracrveni dio spektra, te se zbog toga ispred senzora postavljaju filtri koji ne propuštaju infracrveno svjetlo. Međutim, kako ni jedan filter nije idealan, tako nije ni filter ispred senzora za crvenu boju u kameri, te sensor ipak uhvati i dio infracrvenog spektra. Upravo zbog toga je sensor više pobuđen te može točnije izmjeriti svjetlinu crvene komponente svjetla. Za senzore zelene i plave boje to nije slučaj,

#### **4.5. Rezultati određivanja korekcijske funkcije**

budući da oni imaju puno uži spektar osjetljivosti na valne duljine svjetlosti. Upravo iz tih razloga je određivanje korekcijske funkcije pomoću crvene boje dalo najtočnije rezultate u korekciji svjetline projektora na području preklopa dviju projekcija.

Slika 4.7 prikazuje izgled preklopa u slučaju korištenja korekcijske funkcije izmjerene crvenom bojom za generiranje korigirane maske za korekciju osvjetljenja kao što je opisano jednadžbom (11). Valja uočiti poboljšanje izgleda preklopa u odnosu na korekciju bez korekcijske funkcije na slici 3.5.



*Slika 4.7: Linearna korekcija osvjetljenja na području preklopa s korekcijskom funkcijom izmjerenom pomoću crvene boje*

### 5. Priprema video zapisa za prikaz

U dosadašnjim razmatranjima koncentrirali smo se najviše na izradu algoritama pomoću kojih se provodi korekcija osvjetljenja projektor pa moramo nešto reći o načinima kako tu korekciju iskoristiti za stvarno generiranje slike ili videa koji će biti prikazan na projektorima. Sama korekcije osvjetljenja se može napraviti na dva načina i to prije prikaza ili u stvarnom vremenu [8], tijekom prikaza slike ili videa. Oba načina prikaza predstavljaju izazov za razvoj jer svaka metoda ima svoje prednosti i nedostatke. Ako radimo korekciju osvjetljenja prije samog pristupa ne moramo toliko paziti na efikasnost našeg algoritma jer brzina nije toliko važna, ukoliko uzmemo brže računalo postupak obrade slike ili videa će prije završiti, ali to nije fleksibilno rješenje jer ukoliko se neki od projektor malo pomakne i time promijeni matricu za korekciju osvjetljenja potrebno je i svaki videozapis ponovno pripremiti za prikaz što u nekim situacijama i nije prihvatljivo. Ako radimo korekciju osvjetljenja u stvarnom vremenu onda nismo toliko vezani uz pripremu videozapisa za reprodukciju jer se sama priprema događa prilikom same reprodukcije. Iako se ta metoda čini savršenom, istina je ipak malo drugačija jer je potrebno poprilično snažno računalo koje može raditi u stvarnom vremenu budući da je sama reprodukcija videozapisa puno jednostavnija od pripreme videozapisa. Tako su tijekom rada napravljene dvije varijante programa za korekciju osvjetljenja, ona koja korekciju primjenjuje na videozapis prije reprodukcije i ona koja to radi prilikom same reprodukcije videozapisa. Sama primjena korekcijske maske na ulazni videozapis nije pretjerano komplicirana, ali povlači za sobom puno matematičkih operacija nad samo jednom slikom našeg videozapisa.

U svim ovim razmatranjima treba napomenuti da je nad slikom uvijek u prethodnom koraku potrebno napraviti geometrijsku korekciju slike jer bi u ovisnosti o položaju naših projektor, slika izgledala manje ili više nepravilno. Sama geometrijska korekcija se radi na temelju homografijskih matrica dobivenih u fazi kalibracije projektor. Prilikom geometrijske korekcije važno je napomenuti da se ona provodi za svaki od projektor posebno, odnosno svaki projektor ima svoju homografijsku matricu koja opisuje preslikavanje slike iz projektorske ravnine u ravninu projekcijske površine. Tako računalo koje je spojeno na odgovarajući projektor pomoću homografijske matrice određuje koju transformaciju treba napraviti nad ulaznom slikom te određuje koji dio ulazne slike će se prikazati na tom projektoru. Sve potrebne informacije su sadržane u homografijskim

matricama.

Geometrijska se korekcija može također napraviti prije prikaza kao i u stvarnom vremenu, tijekom prikaza. Očito je da se korekcija osvjetljenja i geometrijska korekcija moraju raditi ili prije prikaza videozapisa ili tijekom prikaza videozapisa jer prednosti i nedostaci geometrijske korekcije prilikom rada u stvarnom vremenu su iste kao i za korekciju osvjetljenja.

Kao što je prije rečeno, primjena korekcije osvjetljenja nije toliko komplicirana, kao što je vidljivo iz jednadžbe (11). Međutim, tu korekciju je potrebno provesti za svaki piksel svake slike video zapisa. Isto vrijedi i za geometrijsku korekciju slike. Zato ako želimo da se te korekcije mogu izvesti u stvarnom vremenu moramo pametno iskoristiti dostupne računalne resurse.

Svi smo svjesni velikog porasta računalnih mogućnosti naših računala pa se postavlja pitanje je li ta računalna snaga dostatna za provođenje geometrijske korekcije i korekcije osvjetljenje u stvarnom vremenu. Odgovor na ovo pitanje je dan u sljedećim potpoglavljima.



### 5.1. Osnovni problemi izvedbe pripreme videozapisa

Problem naših korekcija u stvarnom vremenu ćemo pokušati riješiti na više načina. Prvo rješenje je vjerojatno najintuitivnije jer koristi dobro poznate programske alate i programske tehnike.

Postupak korekcije slike je vrlo jednostavan jer se samo svodi na par množenja. Budući da znamo koje su rezolucije naših projektor mi smo u prethodnim koracima našli maske za korekciju osvjetljenja svakog pojedinog projektor. Maska je određena za svaki kanal posebno pa je za svaki piksel potrebno tri množenja, za svaki kanal po jedno množenje. Mi jednostavno za svaki piksel naše slike koju prikazujemo na odgovarajućem projektoru radimo korekciju na način da vrijednost piksela u nekom kanalu pomnožimo s vrijednošću koja se nalazi u korekcijskoj maski, a koja odgovara tom pikselu i tom kanalu, prema jednadžbi (11).

Kao što je već puno puta rečeno, algoritam je vrlo jednostavan, ali nažalost brzina koja se postiže na ovaj način nije dovoljna da se primjena korekcije radi u stvarnom vremenu. Uzrok treba tražiti u velikom broju matematičkih operacija koji se primjenjuje nad svakom slikom našeg videozapisa. Tako za obradu jedne slike širine 1280 piksela i visine 800 piksela nam je potrebno  $1280 \cdot 800 \cdot 3$  dohvate korekcijske konstante,  $1280 \cdot 800 \cdot 3$  množenja s pomičnim zarezom te  $1280 \cdot 800 \cdot 3$  pridruživanja. Uvijek množimo s tri jer imamo tri kanala za naše slike. To je jako velik broj operacija tako da moramo na neki način povećati brzinu.

U zadnjih nekoliko godina pojavila su se računala koja imaju više jezgara i većina novih računala je opremljena takvim procesorima. Zato bi bilo pametno iskoristiti tu činjenicu i modificirati naš algoritam tako da iskoristi tu činjenicu. [14]

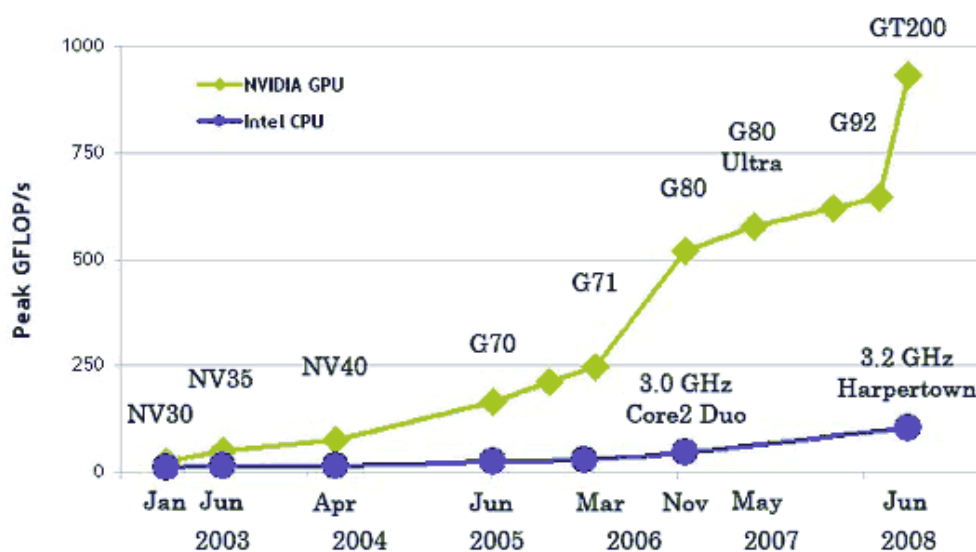
Prilagodba nije pretjerano teška jer zahtjeva od nas da jednostavno naš posao podijelimo na više dijelova tako da pojedina jezgra obavi svoj dio posla. Podjela posla se može napraviti na više načina, možemo našu sliku podijeliti na više dijelova pri čemu tu sliku možemo podijeliti na horizontalne ili vertikalne dijelove, ili pak možemo primijeniti algoritam na odvojenim slikama jer se ipak naš videozapis sastoji od mnogo slika pa postupak podjele nije tako kompliciran. Ubrzanje koje se dobije ovom modifikacijom je unutar očekivanja te se ubrzanje jako lijepo skalira povećanjem broja jezgara. Konkretno

## 5.1. Osnovni problemi izvedbe pripreme videozapisa

na procesoru Intel Core 2 Duo verzija korekcije koja ne koristi više jezgara izvodi korekciju brzinom od otprilike 5 FPS, dok verzija koja koristi obje jezgre procesora korekciju istog filma izvodi brzinom od otprilike 8.5 FPS. Iako je ubrzanje vidljivo, većina današnjih računala ima procesore koje se sastoje od tek dvije ili četiri jezgre pa je očito da ne možemo postići ubrzanje koje će nam omogućiti da provodimo korekciju osvjetljenja u stvarnom vremenu.

Valja uočiti da fleksibilnost procesora omogućava izvedbu korekcije svjetline projektora po svim navedenim jednadžbama (8), (9) i (11).

Postavlja se pitanje postoji li na našim računalima nešto što će nam omogućiti da postignemo naše cilj obrade u stvarnom vremenu. Odgovor je vrlo jasan, postoje grafičke kartice koje su tijekom vremena po svojim mogućnostima jako napredovale te zapravo po svojim performansama nadmašile i najjače procesore. Za usporedbu moramo pogledati graf na slici 5.1. koji pokazuje usporedbu rasta performansi grafičkih kartica i procesora.



Slika 5.1: Usporedba porasta performansi procesora i grafičkih procesora

Vidimo da u posljednje vrijeme performanse grafičkih kartica rastu puno brže od performansi procesora. Za usporedbu, najjači procesor u vrijeme pisanja ovog rada po većini mjerenja je Intelov Core i7-975 XE, a on ima vršnu snagu od 79.9 gigaflopsa [15] dok najjače grafičke kartice imaju vršnu snagu od preko 1000 gigaflopsa [16], što je oko deset puta veća snaga. Očito je da bi se takva snaga mogla iskoristiti za naš problem i omogućiti nam da se korekcija osvjetljenja provodi u stvarnom vremenu. Jasno da treba

## **5.1. Osnovni problemi izvedbe pripreme videozapisa**

---

uzeti u obzir i tehnike programiranja dostupne za grafičke procesore.

Donedavno je programiranje grafičkih procesora bilo izuzetno teško i komplicirano, ali su se s vremenom stvari promijenile pa se zadnjih godina grafički procesori koriste za mnogobrojne primjene koje ne uključuju čisto prikazivanje slike za što su grafički procesori izvorno bili razvijeni. Taj pristup se naziva GPGPU (General Purpose computing on Graphics Processing Unit), odnosno programiranje opće namjene na grafičkim procesorima. Često se grafički procesori koriste u problemima obrade slike, računalnog vida te svim ostalim problemima koji imaju korist od visoko paralelne arhitekture. Poznato je da grafički procesori obrađuju milijune i milijune piksela svake sekunde prilikom igranja videoigara pa je onda jasno da bi ta procesna moć trebala biti dovoljna za korekciju osvjetljenja u stvarnom vremenu. Iako smo rekli da se grafički procesori sve više koriste za programiranje opće namjene treba uzeti u obzir da zapravo grafički procesori nisu za to prilagođeni. Očito je da postoji problem prijenosa podataka između systemske memorije i memorije grafičke kartice, a taj problem može u znatnoj mjeri usporiti rad našeg programa.

Trenutačno postoji više načina na koji se može grafički procesor programirati za programiranje opće namjene. U daljnjem tekstu su obrazložene dvije metode, od kojih svaka ima svoje prednosti i nedostatke.

### 5.2. CUDA verzija

Kao što sam podnaslov kaže koristit ćemo CUDA-u (Compute Unified Device Architecture) [5], odnosno u ovoj verziji će se napraviti implementacija korekcije slike pomoću programiranja opće namjene za grafičke procesore. Gore navedena tehnologija omogućuje programiranje slično programiranju za obične procesore, samo se kod ne izvršava na običnim već na grafičkim procesorima. Programi se pišu u svima poznatom programskom jeziku C, koji je malo izmijenjen u svrhu efikasnijeg korištenja mogućnosti paralelizma prisutnog u grafičkim procesorima. Prednost ovog pristupa je očita jer nam omogućuje da bez puno učenja napravimo programe koji su puno brži od programa namijenjenih običnim procesorima. Nedostatak ovog pristupa je taj da je to tehnologija koja je isključivo dostupna na novijim generacijama Nvidijinih grafičkih procesora pa tako predstavlja limitirajući faktor za njezinu uporabu. Postoje i slična rješenja konkurentskih proizvođača, ali ta rješenja nisu još uvijek na odgovarajućem stupnju razvoju koja bi omogućila njihovu širu primjenu.

Valja napomenuti da je korištenjem CUDA-e moguća implementacija korekcije svjetline samo u obliku opisanom jednadžbom (11), jer je radni takt paralelnih procesorskih jedinica grafičke kartice prenizak za dovoljno brzu evaluaciju korekcijske funkcije u jednadžbi (8). Također nije moguće koristiti korekciju svjetline opisanu jednadžbom (9), jer za veličinu slika od 1280x800, veličina LUT-a dostiže čak 250 MB, što je prevelika količina podataka za većinu današnjih grafičkih kartica.

Ako se radi obrada u stvarnom vremenu treba rezultat obrade prikazivati na ekranu, a kod ove tehnologije prikaz nije tako brz jer rezultat obrade treba privremeno pohraniti, a onda tako pohranjeni sadržaj prikazati na ekranu. Iako smo napomenuli da je programski model vrlo jednostavan, zbog arhitekture grafičkih procesora, vrlo se jednostavno može napraviti greška u dizajnu algoritma koji može dovesti do degradacije performansi.

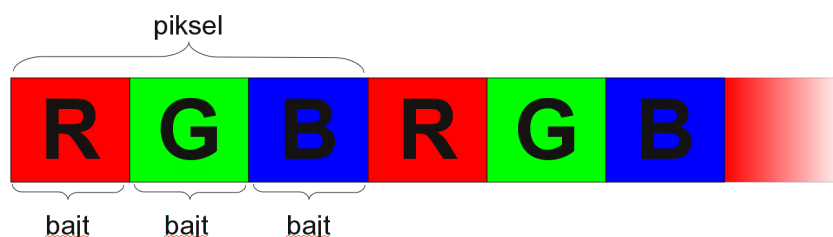
Kad smo naveli prednosti i nedostatke te arhitekture, trebamo reći kako se korekcija slike može napraviti ovim programskim modelom. Ideja je slična ideji koju smo koristili kod paralelizacije algoritma za više jezgara, samo je ovdje stupanj paralelizma izraženiji. Jedina razlika je što se paralelizam nužno provodi unutar jedne slike našeg videozapisa. Mi dijelimo sliku na mnogo dijelova od kojih jedna dretva obrađuje odgovarajući dio slike.

U skladu s programskim modelom jedna dretva treba obraditi relativno malo podataka, pa imamo jako mnogo dretvi. U našem slušaju, broj dretvi se računa prema jednostavnoj formuli.

$$n = w \times h / 4 \quad (12)$$

U formuli (12),  $n$  predstavlja broj dretvi,  $w$  predstavlja širinu slike izražene u pikselima, a  $h$  predstavlja visinu slike izraženu u pikselima.

Razlog te formule je vrlo jednostavan, a posljedica je arhitekture grafičkih procesora. Unutar grafičkih procesora određene operacije su optimizirane za odgovarajuće tipove podataka pa je dobro poznato da je u CUDA programskom modelu čitanje 32 bitnih podataka daleko učinkovitije od čitanje 8 bitnih podataka, mi smo se odlučili da jedna dretva obrađuje 4 piksela jer je svaki piksel predstavljen pomoću 8 bita. Na slici 5.2 vidimo kako je pohranjena slika u memoriji. Mi prema tome unutar jedne dretve radi jednostavnosti obrade čitamo po 96 bita podataka, što predstavlja 4 trokanalna piksela dubine 8 bita. Zato je jasno da u formuli određujemo broj dretvi na gore navedeni način. Nakon što se unutar svake dretve provede korekcija osvjetljenja tako dobiveni rezultat se pohrani na određeno mjesto u memoriji. Završetkom provedbe korekcije, rezultat iste se mora prikazati.



Slika 5.2: Prikaz pohrane slike u memoriji računala

### 5.3. OpenGL verzija

Programski model baziran na CUDA-i nema baš razvijen sustav za prikaz, odnosno potrebno je koristiti neke druge programske biblioteke za prikaz. Upravo je to glavni nedostatak onog programskog modela jer se jako puno vremena troši na prikaz dobivenih rezultata.

Zato uvodimo programski model OpenGL-a [3] koji je bolje prilagođen našem problemu. Osim OpenGL-a postoje i druge tehnologije poput DirectX-a, ali OpenGL je izabran poglavito zbog jednostavnosti programiranja u njemu te podršci za sve poznatije operacijske sustave.

Programski model koji nam pruža OpenGL je puno primjereniji prikazu jer je i to njegova osnovna zamisao – rad s dvodimenzionalnim i trodimenzionalnim objektima. Sam programski model OpenGL-a nam pruža iskorištavanje punog potencijala grafičkih procesora uporabom shadera ([2], [6]), odnosno malih programa koji se izvršavaju za svaki element ulazne slike. OpenGL nam služi kako bismo omogućili uporabu tih shadera te jednostavan prikaz dobivenih rezultata na projektorima. Tako smo za potrebe korekcije osvjetljenja napravili jedan pixel shader, podvrstu shadera koji radi nad bojom svakog izlaznog piksela. On jednostavno svaki piksel naše ulazne slike množi s korekcijskom konstantom.

Pixel shader je poprilično intuitivan i svodi se na dohvat nekorrigirane vrijednosti, odnosno ulaznog piksela te množenja takve vrijednosti s korekcijskom konstantom. Novostvorena vrijednost je korigirani ulazni piksel i direktno se može koristiti za prikaz na ekranu.

Što je naš grafički procesor brži to je i izvođenje našeg shadera brže. Vidimo da je ovo rješenje jako kratko i intuitivno te daje jako dobre rezultate.

Rješenje koje koristi OpenGL za korekciju osvjetljenja se pokazalo najbržim na svim testovima kao što vidimo u tablici 1. Osim toga to rješenje je veoma intuitivno te rasterećuje procesor računala za njegovu uporabu u druge svrhe.

Tablica 1: Usporedba brzina izvođenja korekcije slike korištenjem različitih programskih modela

Procesor	Procesor – korištenje više jezgara	CUDA	OpenGL
5 FPS	8,5 FPS	50 FPS	60 FPS

OpenGL se pokazao najbržim i najboljim rješenjem, a njegova najveća prednost stoji i u tome što je standardiziran te time neovisan o platformi i hardveru.

### 6. PanoVRama – sustav za višeprojektorsku panoramsku vizualizaciju

Višeprojektorski sustav za panoramsku vizualizaciju PanoVRama, razvijen u IPG-u Zavoda za elektroničke sustave i obradu informacija na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, jest sustav za popločenu vizualizaciju koji može prikazivati slike i video zapise pomoću više projektora. Projektori mogu biti posloženi u pravokutnu mrežu MxN. Oni su spojeni na računala koja su umrežena u lokalnu mrežu u kojoj jedno glavno računalo upravlja prikazom slike na ostalim računalima. Svako računalo upravlja dvama projektorima.

Tijekom 19. Dana hrvatskog filma koji su se održavali od 6. do 11. travnja 2010. godine u Studentskom centru, demonstriran je sustav PanoVRama koji se sastojao od 6 horizontalno postavljenih projektorima, odnosno projektori su bili posloženi u mrežu 1x6. Slika 6.1. prikazuje kako je izgledala popločena projekcija.



Slika 6.1: Prikaz popločene projekcije na 19. Danima hrvatskog filma



## 7. Popis literature

- [1] B. Sajadi, M. Lazarov, M. Gopi, A. Majumder, *Color Seamlessness in Multi-Projector Displays Using Constrained Gamut Morphing*, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009.
- [2] R. Geiss et al., GPU Gems 3, Addison Wesley, 2009.
- [3] J. Neider, T. Davis, M. Woo, *The Red Book – OpenGL Programming Guide*, 13.04.2009.  
<http://unreal.srk.fer.hr/theredbook/>
- [4] R. Raskar, J. van Baar, S. Rao, T. Willwacher, *Multi-Projector Imagery on Curved Surfaces*, Mitsubishi Electric Research Labs, 2003.
- [5] *NVIDIA CUDA Programming Guide, Version 2.3.1*, Addison Wesley, 2009.
- [6] M. J. Kilgard, *The Cg Tutorial: The Definitive Guide to Programmable Real-time Graphics*, Addison Wesley, 2003.
- [7] B. Trubic, I. Kust, P. Paar, D. Petek, D. Hrenek, R. Perica, P. Prentasic, N. Miksa, A. Hedji, M. Subasic, H. Kalinic, S. Loncaric, *System for multiple projector-based tiled video playback*, unpublished
- [8] T. Akenine-Moller, E. Haines, N. Hoffman, *Real-Time Rendering, Third Edition*, AK Peters, 2008.
- [9] Hartley R., Zisserman A., *Multiple View Geometry in computer vision, 2nd ed*, United Kingdom, 2003
- [10] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, *Digital Image Processing (3rd Edition)*, Prentice Hall, 2007.
- [11] M. Hereld, I. R. Judson, R. L. Stevens, *Introduction to Building Projection-based Tiled Display Systems*, IEEE Computer Graphics, vol 20, no. 4, pp. 22-28, July/August 2000
- [12] P. d'Angelo, *Radiometric alignment and vignetting calibration*, University of Bielefeld, Technical Faculty, Applied Computer Science
- [13] V. Henč-Bartolić, P. Kulišić, *Valovi i optika*, Školska knjiga, Zagreb, 2004.

- [14] B. Lewis, D. J. Berg, *Multithreaded Programming With PThreads*, Prentice Hall, 1997.
- [15] Wikipedia, FLOPS, <http://en.wikipedia.org/wiki/FLOPS>, 28. 04. 2010.
- [16] Wikipedia, Comparison of Nvidia graphics processing units, [http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison\\_of\\_Nvidia\\_graphics\\_processing\\_units](http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_Nvidia_graphics_processing_units), 28. 04. 2010.

## **8. Sažetak**

**Nenad Mikša, Pavle Prentašić**

**Korekcija slike projektoru u sustavima za popločenu vizualizaciju u stvarnom vremenu**

Popločene vizualizacije imaju sve važniju ulogu u našem životu. Koristimo ih za zabavu, istraživanja, grafičke primjene itd. Na pisanje ovog rada nas je motivirao nedostatak takvog sustava na našim prostorima. Tijekom izrade ovog rada, napravljen je sustav za popločenu vizualizaciju pomoću više projektoru. Sustav je skalabilan i modularan jer omogućuje spajanje neograničenog broja računala i projektoru koji sinkronizirano prikazuju panoramske videozapise. Problemi riješeni u ovom radu protežu se kroz više grana računarstva. Između ostalog, uključuju probleme korekcije osvjetljenja projekcija na preklopima, linearizaciju nelinearne prijenosne karakteristike projektoru te oblikovanje sustava za popločenu vizualizaciju koji radi u stvarnom vremenu. Osim toga, prikazana je konkretna upotreba takvog sustava na 19. Danima hrvatskog filma.

Ključne riječi: popločena vizualizacija, kalibracija svjetline projektoru, obrada videa u stvarnom vremenu

## **9. Summary**

**Nenad Mikša, Pavle Prentašić**

### **Real-time projector image correction in tiled visualization systems**

Tiled visualizations are getting more important in our lives every day. We use such systems for entertainment, research, graphical application, etc. The absence of such system in our area motivated us for writing this paper. The system for multi-projector tiled visualization has been developed. The system is scalable and modular, because it allows us to use unlimited number of computers and projectors for synchronized panoramic video playback. Problems from multiple computer science branches had to be overcome, including overlapping area image blending and brightness correction, projector brightness transfer function linearization and tiled display system development, which can work in real time. The real application of such system was presented on 19<sup>th</sup> Days of Croatian Film.

Keywords: tiled visualization, projector brightness calibration, real-time video processing