

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
MATEMATIKOS IR INFORMATIKOS FAKULTETAS  
INFORMATIKOS KATEDRA

# **Spalvų atstatymas daugiaspektrių apšvietimu**

## **Color Restoration Using Multispectral Lighting**

Magistro baigiamasis darbas

Atliko:	Justinas Rumševičius	(parašas)
Darbo vadovas:	prof. dr. Rimantas Vaicekuskas	(parašas)
Recenzentas:	doc. dr. Aistis Raudys	(parašas)

Vilnius 2018

## Santrauka

Magistro baigiamojo darbo tikslas yra ištirti galimybę panaudoti daugelio individualiai valdomų spalvinių kanalų apšvietimo įrenginį pakitusių paviršiaus spalvų atstatymui. Apšvietimo simuliaciniuose eksperimentuose buvo naudojamos Vilniaus universiteto apšvietimo grupės tyrėjų sukurto 10 kanalų apšvietimo įrenginio dalinių spektrų vertės bei išmatuotos dirbtinai pasendintų 25 spalvinių bandinių charakteristikos. Spalvų atstatymas buvo suvestas į minimizavimo uždavinį, kuriame reikia rasti atskirų apšvietimo spalvinių kanalų intensyvumus, minimizuojančius spalvinių bandinių atstatymo klaidą. Uždavinio sprendimui buvo panaudotas Nelder-Mead algoritmas. Minimizavimo uždavinyje buvo taikomi keturi individualaus bandinio spalvinių skirtumą įvertinantys kriterijai, apibrėžti CIE L\*a\*b\* spalvinėje erdvėje. Virtualaus atstatymo eksperimentai buvo atlikti deriniams iš vieno, dviejų, trijų, keturių, penkių ir visų spalvinių bandinių. Atlikus eksperimentus buvo padaryta išvada, kad apšvietimu pilnai galima atstatyti tik kelias spalvas. Daugelio spalvų pilnas atstatymas yra praktiškai neįgyvendinamas: vienos spalvos atstatymas gali iškraipyti kitas atstatomas spalvas. Tai galima paaiškinti nedideliu skaičiumi naudojamų pirminių šaltinių (valdomų parametrų kiekiu), bei žymiu pirminių šaltinių banginio ilgio plociu (ne siauresni, nei 30nm LED spektrai).

## Summary

The goal of this master's thesis is to investigate a possibility to use lighting device with multiple individually controlled channels to restore deteriorated colors of a surface. In simulated lighting experiments spectra values of lighting device with 10 channels created by Vilnius university lighting group researchers and measured characteristics of 25 color samples that were artificially aged by the same group were used. The problem of color restoration was reduced into a minimization problem, which searches for intensities of individual lighting channels that minimize restoration error of color samples. Nelder-Mead algorithm was used to solve the optimization problem. In minimization problem four criteria that measured color difference of individual color sample were used. Virtual restoration experiments were done for combinations of one, two, three, four, five and all color samples. After these experiments were carried out, a conclusion was drawn that it is possible to fully restore only a couple of colors using a single lighting. Full restoration of many colors is practically not achievable: restoration of one color may negatively affect other colors that are being restored. This can be explained by small number of initial light channels (number of controlled variables) and wide spectrum of these light sources (no less than 30nm LED spectrum).

# Turinys

Santrauka .....	1
Summary .....	2
Įvadas .....	4
Darbe nagrinėjama problema .....	4
Darbo tikslas ir uždaviniai .....	6
1. Šviesa ir spalvos .....	8
2. Spalvinės erdvės .....	10
2.1. Erdvės .....	10
2.1.1. RGB .....	10
2.1.2. CIE XYZ .....	10
2.1.3. CIE L*a*b* .....	10
2.2. Konvertavimas .....	11
2.2.1. Iš RGB į CIE XYZ .....	11
2.2.2. Iš CIE XYZ į CIE L*a*b* .....	12
3. Panašūs eksperimentai .....	13
3.1. Pageltusio lako poveikio panaikinimas .....	13
3.2. Harvardo freskų restauracija .....	15
3.3. Objektų išvaizdos keitimas naudojant projektorių (2004) .....	16
3.4. Objektų išvaizdos keitimas naudojant projektorių (2013) .....	17
3.5. Virtuali spalvų rekonstrukcija realiems paveikslams naudojant apšvietimą .....	17
3.6. Skaitmeninis senų paveikslų spalvų atstatymas .....	18
3.7. LED šviestukų panaudojimas muziejaus eksponatų spalvų paryškiniui .....	19
3.8. Spektrinis žalos modelis .....	21
4. Optimizavimo uždavinio sprendimas .....	22
4.1. Optimizavimo problema šiame darbe ir uždavinio formulavimas .....	22
4.2. Skirtumo tarp dviejų spalvų įvertinimas .....	22
4.3. Minimizavimo metodai .....	22
4.4. Nelder-Mead metodas .....	23
4.5. Galimų reikšmių apribojimas .....	25
5. Spalvų atstatymo simulatorius .....	27
5.1. Įvestis ir išvestis .....	27
5.2. Veikimo principas .....	28

5.3. Klaidos įvertinimo funkcijos .....	29
5.3.1. Klaidos įvertinimas $L^*a^*b^*$ erdvėje.....	29
5.3.2. Klaidos įvertinimas $a^*b^*$ projekcijoje.....	30
5.3.3. Klaidos įvertinimas atspalvio atžvilgiu.....	30
5.3.4. Klaidos įvertinimas sodrio atžvilgiu .....	30
5.4. Atstatymas.....	31
5.4.1. Atstatymo įvertinimas.....	31
5.4.2. Nelder-Mead algoritmo iteracijų skaičiaus.....	31
5.5. Vieno spalvinio bandinio atstatymo eksperimentas .....	32
5.6. Dviejų spalvinių bandinių atstatymo eksperimentas .....	33
5.7. Trijų spalvinių bandinių atstatymo eksperimentas.....	36
5.8. Keturių spalvinių bandinių atstatymo eksperimentas.....	39
5.9. Penkių spalvinių bandinių atstatymo eksperimentas .....	40
5.10. Visų spalvinių bandinių atstatymo eksperimentas .....	42
Išvados .....	43

## **Įvadas**

Didžiąją dalį informacijos apie mus supantį pasaulį suteikia rega. Rega, spalvinis suvokimas yra sudėtingi procesai, kuriuos sukelia šviesa (elektromagnetinė spinduliuotė regai jautriame diapazone), atspindėta nuo aplinkos objektų. Taigi, aplinkos vaizdą nulemia ne tik objektų bet ir apšvietimo šaltinio (spektrinės) savybės. Technologinis progresas suteikė galimybę įvairiai komponuoti apšvietimo spektrą ir tuo pačiu sukelti apšviestų objektų spalvinius pokyčius. Pavyzdžiui, įmanoma valdyti scenos spalvinį kontrastą, didinti ar mažinti vaizdo sodrį, formuojant apšvietimą iš tam tikru būdu parinktų spalvinių komponenčių, kurias galima realizuoti puslaidininkiniais šviestukais (angl. LED) [ŽVV<sup>+</sup>13]. Po sodrio manipuliavimo eksperimentų naudojant kompiuterio valdomą daugiakanalį apšvietimo įrenginį kilo klausimas: jei turime objektą (pvz., paveikslą), kurio spalvos yra išblukusios, ar galime jį apšviesti taip, kad visiškai arba dalinai atstatytume pradines spalvas? Dirbtinio apšvietimo iššauktų paviršiaus spalvų pokyčių problematiką nagrinėja Vilniaus universiteto apšvietimo tyrėju grupė, kuri vykdė mokslinį projektą, susijusį su spalvų atstatymu. Magistrinis darbas taps vykdyto projekto papildymu.

## **Darbe nagrinėjama problema**

Išoriniai poveikiai, pavyzdžiui, saulės šviesa ir karštis, keičia objektų išvaizdą. Dažniausiai tai yra ne tik nepageidaujami, bet ir negrįžtami pokyčiai. Šis reiškinys yra aktualus kalbant apie ypač senus, kelių šimtų ar tūkstančių metų senumo objektus, kurie buvo ilgai veikiami ultravioletinės arba infraraudonos spinduliuotės (saulė skleidžia abi šias spinduliuotes). Dėl žalingų išorės veiksnių stebėtojai mato nebe originalią, o pakitusią daikto išvaizdą. Todėl neįmanoma susidaryti realaus vaizdo, o dėl to galima klaidingai interpretuoti objekto paskirtį, jo prasmę, pavyzdžiui, meno kūrinio nuotaiką. Išvaizdą galima bandyti atstatyti į pradinę objekto atvaizdą perkeliant į skaitmeninę erdvę ir ten pakoreguojant atspalvį (angl. hue) [PP00], tačiau čia dingsta dalis autentiškumo. Kitas būdas yra restauruoti objekto išvaizdą jį apšviečiant konkrečiam atvejui pritaikytu apšvietimu [ŽVV<sup>+</sup>12]. Tai nesukeltų negrįžtamų neigiamų fizinių pasekmių ir suteiktų galimybę stebėti realų fizinį objektą, o ne spalviškai apdorotą (pakoreguotą) jo atvaizdą ekrane.

Kiekvienas objektas atspindi tam tikras spalvas. Spalvinį pojūtį sukelia specifinio ilgio elektromagnetinės bangos. Spektriniu skirstiniu arba tiesiog spektru vadinsime elektromagnetinio spinduliavimo galios pasiskirstymo funkciją priklausomai nuo bangos ilgio. Žmogaus spalvinė rega yra šviesos (spektro) projekcija į trimatę (X, Y, Z) veikmių plokštumą. Šviesą, kaip fizikinį reiškinį, su spalvomis - jutiminiu reiškiniumi susieja kolorimetrijos mokslas [WS00]. Akis turi

trijų tipų ląsteles, iš kurių kiekviena turi nevienodą jautrį skirtingoje banginėje srityje. Kadangi kiekvienas stebėtojas yra šiek tiek kitoks, nei kiti, todėl spalvų ir bendro vaizdo supratimas yra subjektyvus. Šiai problemai spręsti yra nustatytas standartizuotas modelis – CIE 1931 [Wiki00], apibrėžiantis standartinį stebėtoją, kuriam yra išmatuotos jautrio funkcijos  $\bar{x}()$ ,  $\bar{y}()$  ir  $\bar{z}()$ . Šis stebėtojas yra gautas paėmus vidutinį žmonių jautrį spalvoms. Tai leidžia pereiti į trijų dydžių - X, Y ir Z erdvę. Šioje erdvėje Y parametras yra susijęs su šviesumo, o X ir Z – su spalvų pojūčiu.

Spalvų atstatymo tikslas yra parinkti tokį apšvietimo spektrą, kad apšviesto objekto paviršiaus spalvinis nuokrypis būtų kuo mažesnis nuo originalaus paviršiaus. Praktiškai pasiekti nulinį nuokrypį yra neįmanoma, todėl rezultatų lyginimui ir įvertinimui reikės matuoti spalvinius skirtumus. Kadangi duomenys nėra tinkamo vertinimui pavidalo, todėl reikia gautas spalvų koordinates (X, Y ir Z) transformuoti į naujas, kuriose atstumas tarp taškų atitiktų regimąjį spalvinį skirtumą. Paprasčiausiu atveju yra tinkama CIE L\*a\*b\* spalvinė erdvė [Wiki01], tačiau galima naudoti ir sudėtingesnes (modernesnes) spalvines erdves. Rezultatus galima pateikti tiek skaitiniu pavidalu, tiek ir CIE L\*a\*b\* spalviniu žemėlapiu. Kadangi vienu metu bus dirbama su keliomis, o ne su viena spalva, todėl reikės sugalvoti ir pritaikyti kitus būdus CIE L\*a\*b\* erdvėje vertinti dviejų vektorių skirtumą. Tokiam vertinimui galima panaudoti, pavyzdžiui, kvadratinį matą. Konkretaus būdo pasirinkimas priklausys nuo darbo eigoje iškilusių problemų ir gautų rezultatų.

Spalvų atstatymas jas apšviečiant turi vieną esminį pavojų - vienos spalvos atstatymui skirta šviesa gali iškreipti („sugadinti“) kitą spalvą. Taip pat jeigu naudojamų šviestukų spektrai yra labai glodūs, užimantys didžiąją dalį matomos spektro srities (tokie yra fosforų pagrindu gaminami šviestukai), galima daryti išvadą, kad atstatymas nepavyks, nes spalvai atstatyti skirta šviesa uždengs kitų spalvų spektro dalis. Puslaidininkinių šviestukų standartinės gamybos technologijos įgalina pagaminti šviestukus, kurių spektro kreivės forma yra artima Gauso formoms ir jų spektro plotis pakankamai siauras (apie 30nm). Egzistuoja ir kitos sunkiau įgyvendinamos technologijos, pavyzdžiui lazeriai, kurie gali generuoti šviesą labai siaurame banginiame ruože, t.y. praktiškai monochromatinę spalvą. Tokių technologijų naudojimas leistų pasiekti tikslesnį atstatymą, nei naudojant standartinę technologiją. Uždavinį apsunkina ir tai, kad realiomis sąlygomis dažniausiai pasitaikys ne grynos spalvos, o sumaišytos tarpusavyje. Įgyvendinant sprendimą taip pat problematiškas originalios spalvos elemento sutapatinimas su nublukusia spalva.

## **Darbo tikslas ir uždaviniai**

Šio darbo tikslas yra sukurti modelį, kuris leistų parinkti apšvietimo spektrą taip, kad apšvietus konkretų objektą, kurio paviršiaus spalvos yra pakitusios, jis atgautų savo pirminį vaizdą.

Nuo objekto paviršiaus atspindėtos šviesos spektras yra lygus:

$$S'(\lambda) = S(\lambda) \cdot R(\lambda),$$

kur  $S(\lambda)$  yra apšvietimo, o  $R(\lambda)$  – paviršiaus atspindžio spektras.

Pradinio uždavinio supaprastinimui bus padarytos kelios prielaidos, nes idealiai atstatantis apšvietimas praktiškai yra neįgyvendinamas uždavinys. Kadangi yra rizika, kad spalva gali būti kelių spalvų mišinys, bus remiamasi prielaida, kad stebimame objekte yra panaudotos tik kelių dažų/pigmentų spalvos o ne jų mišiniai (kurių atspalviai susiję sudėtingomis priklausomybėmis su bazinių pigmentų/dažų spalvomis). Taip pat daroma prielaida, kad naudojamas sudėtinis šaltinis, susidedantis iš atskirų šviestukų spektrų, kurių intensyvumas gali būti keičiamas. Spalvų restauravimui naudojamas sudėtinis apšvietimas gali būti apibrėžiamas:

$$S(\lambda) = \sum_{j=1}^k a_j \cdot S_j(\lambda)$$

kur  $k$  yra apšvietimo komponentių skaičius,  $a_j$  yra komponentės intensyvumas, o  $S_j(\lambda)$  – komponentės spektras. Yra žinomos originalios spalvos

$$r_1, \dots, r_n,$$

kur  $r_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ , o  $n$  yra spalvų skaičius. Taip pat yra žinomos tos pačios spalvos, pakeitusios išvaizdą dėl išorinių poveikių:

$$r'_1, \dots, r'_n,$$

Originalios ir pakitusios spalvos gali būti gaunamos jas išmatuojant arba apskaičiuojant (kai žinomi  $S(\lambda)$ ,  $R(\lambda)$  ir  $R'(\lambda)$  spektrai).

Yra išmatuota ir kiekvieno pasendinto spalvinio bandinio spalva, apšvietus kiekviena sudėtinio apšvietimo šaltinio komponente (arba spalvą galima apskaičiuoti, kai duoti/žinomi apšvietimo komponentių spektrai ir paviršiaus spalvų atspindžio spektrai):

$$r''_{ij}, j = 1, \dots, k, i = 1, \dots, n$$

Spalvų restauravimas tampa optimizavimo uždaviniu, kurį reikią išspręsti norint rasti geriausiai atstatantį (transformuojantį spalvas į kuo artimesnes pradinėms spalvoms) apšvietimą. Tikslas yra apskaičiuoti sudėtinio šaltinio atskirų komponentių svertinius koeficientus (intensyvumus)  $a$ ,



tokius, kad spalvinio atstatymo klaida būtų minimali:

$$\min_{i=1, \dots, n} \max_{j=1, \dots, k} D(a_j \cdot r''_{ij}, r_i)$$

kur  $D(r_1, r_2)$  – netiesinė dviejų spalvų nesutapimo vertinimo funkcija.

Kaip jau minėta anksčiau, galimos įvairios spalvinio vektoriaus atstatymo klaidos funkcijos, aukščiau pateikta tik viena iš jų.

Darbas susideda iš trijų dalių. Pirmoje dalyje (Įvadas) yra aptariami darbo tikslai, suformuluojamas uždavinys, iškeliamos hipotezės. Antroje dalyje yra ieškoma informacijos apie kertinius darbo blokus, aiškinamos sąvokos (1, 2 skyriai) atliekama literatūros analizė, kur yra nagrinėjami jau atlikti panašūs darbai (3 skyrius), renkama medžiaga uždavinių sprendimui (4 skyrius) tolimesniuose skyriuose. Trečioje dalyje yra aprašomas apšvietimo simulatorius (5 skyrius) ir atliekami virtualūs eksperimentai, kuomet bandoma atstatyti vieną ar kelias spalvas.

# 1. Šviesa ir spalvos

Šviesa yra tam tikro dažnio elektromagnetinės bangos, sklindančios erdvėje. Kaip ir visas bangas, šviesą apibūdina trys parametrai: bangos ilgis arba dažnis, greitis ir poliarizacija. Dažnis nurodo bangos pasikartojimus per sekundę ir yra atvirkščiai proporcingas ilgiui - atstumui tarp tos pačios vietos gretimuose pasikartojimuose. Šviesos greitis parodo koku greičiu sklinda banga terpėje ir yra konstanta toje terpėje. Didžiausias greitis yra vakuume - 299792458 m/s. Poliarizacija apibūdina kokioje plokštumoje vyksta elektromagnetinės bangos svyravimai. Šviesos greitis ir poliarizacija šiame darbe nėra svarbūs, todėl toliau jie nebus nagrinėjami ir į juos nebus atsižvelgiama. Priklausomai nuo bangos ilgio, elektromagnetinės bangos yra skirstomos į radijo bangas, mikrobangas, infraraudonąją spinduliuotę, regimąją šviesą, ultravioletinę spinduliuotę, rentgeno spinduliuotę ir gama spinduliuotę. Regimoji šviesa yra spektras, kurio bangos ilgis patenka tarp maždaug 360nm ir 750nm [BFH13]. Nors regimosios šviesos spektras yra palyginus siauras, čia patenka visos žmogaus matomos spalvos. Skirtingų ilgių bangos yra suvokiamos kaip skirtingos spalvos šviesa. Trumpiausias bangas žmogus mato kaip violetinę spalvą (kuri pereina į ultravioletinę spinduliuotę), ilgiausias - kaip raudoną (kuri pereina į infraraudonąją spinduliuotę). Kitos spalvos yra išsidėsčiusios tarp jų.

Spektrinis energijos pasiskirstymas (angl. spectral power distribution) parodo kiek energijos yra išskiriama kiekvienam bangos ilgiui. Kiekvienas šviesos šaltinis turi savo spektrinį pasiskirstymą, pavyzdžiui, kaitrinė lemputė išskiria daugiau energijos raudonojoje spektro pusėje. Dauguma kasdienių šaltinių išskiria energijos visuose spektro dažniuose, tačiau išskiriamos energijos kiekis gali ženkliai skirtis. Tik kaikurie šviesos šaltiniai, pavyzdžiui LED šviestukai ar lazeriai, turi siaurą skleidžiamos šviesos spektrą. [Hel08]

Panašiai kaip šviesos šaltiniai turi spektrinį energijos pasiskirstymą, paviršiai turi atspindžio spektrą. Paviršiaus atspindžio spektras parodo kaip paviršius atspindi skirtingo ilgio elektromagnetines bangas. Priklausomai nuo atspindėtų ir sugertų bangų, paviršius atrodo vienokios ar kitokios spalvos.

Matoma objekto spalva susideda iš apšvietimo spektro ir paviršiaus atspindžio spektro. Kai paviršius yra apšviečiamas apšvietimu, kurio spektrinis energijos pasiskirstymas yra  $S(\lambda)$ , o paviršiaus atspindžio spektras yra  $R(\lambda)$ , tai atspindėjusi spalva yra

$$S'(\lambda) = S(\lambda) \cdot R(\lambda) \quad (1)$$

Kadangi gautas spektras yra kitų dviejų spektrų sandauga, tai jei reikšmė ties tam tikru

bangos ilgiu bet kuriame spektre bus 0, tai ir gautame spektre ta reikšmė bus 0. Tai reiškia, kad jei paviršius, kuris atspindi tik siaurą raudonos spalvos spektrą (ryškiai raudonas paviršius) bus apšviestas apšvietimu, kurio spektrinis pasiskirstymas yra siauras mėlynos spalvos ruožas (ryškiai mėlyna šviesa), atrodo juodas, tai yra, neatspindės jokios šviesos nepriklausomai nuo apšvietimo stiprumo. Tačiau jeigu paviršius kažkiek atspindi tam tikrą bangos ilgį, atspindėtos šviesos stiprumą galima padidinti padidinant apšvietimo šaltinio skleidžiamos energijos kiekį. Rezultate gaunamas vienos ar kelių spalvų paryškimas.

## 2. Spalvinės erdvės

Spalvinė erdvė yra būdas vienareikšmiškai apibūdinti spalvą nurodant jos vietą Dekarto koordinatinių sistemoje. Tiksliai spalva priklauso nuo to, kokia spalvinė erdvė yra naudojama. Yra ne viena spalvinė erdvė. Kiekviena iš jų skiriasi savo savybėmis: tiesiškumu, intuityvumu žmogui, priklausomybe nuo atvaizduojančio įrenginio. [TT03] [FR98]

### 2.1. Erdvės

#### 2.1.1. RGB

Tai yra adityvi (angl. additive) spalvinė erdvė, paremta trijų spalvų (raudonos, žalios ir mėlynos; angl. Red, Green and Blue) maišymu. Koordinatės yra atskirų komponentių intensyvumai. Pagrindinė idėja kuriant šią erdvę buvo naudoti komponentes, kurios primintų žmogaus akies struktūrą. Žmogaus akyje yra trijų tipų šviesai jautrūs kūgeliai, atitinkamai reaguojantys į raudoną, žalią ir mėlyną spalvas. Jie dar yra vadinami L, M ir S kūgeliais - jautrūs ilgų (angl. Long), vidutinių (angl. Middle) ir trumpų (angl. Short) ilgių bangoms. Ši spalvinė erdvė dažniausiai sutinkama technikoje. Šios erdvės didžiausias trūkumas yra tas, kad atvaizduota spalva priklauso nuo atvaizduojančio įrenginio - dėl techninių ypatumų skirtinguose įrenginiuose tokia pati komponentės reikšmė gali būti skirtingai atvaizduota. [TT03] [FR98]

#### 2.1.2. CIE XYZ

CIE XYZ spalvinėje erdvėje visos regimos spalvos gali būti išreikštos trimis teigiamomis veikmėmis: X, Y ir Z. Ši erdvė nėra priklausoma nuo atvaizduojančio įrenginio. CIE XYZ didžiausias trūkumas yra tas, kad atstumai tarp spalvų nėra tokie patys, kaip žmogaus suvokiamas skirtumas tarp spalvų, pavyzdžiui didžiąją dalį ploto užima žalia zona, o mėlyna zona yra suspausta kampe. Dėl šios priežasties ji netinka įvertinti spalviniam skirtumui. Tačiau dauguma spalvų konvertavimų yra atliekama naudojant CIE XYZ kaip tarpinę erdvę. [TT03] [FR98]

#### 2.1.3. CIE L\*a\*b\*

CIE L\*a\*b\* erdvė yra paremta CIE XYZ erdve. CIE L\*a\*b\* erdvėje a ir b ašys atspindi dvi poras priešingų spalvų. Ašis a yra žalia ir raudona, o b yra geltona ir mėlyna. Tai yra paremta tuo, kad spalva negali vienu metu būti žaliai raudona arba geltonai mėlyna, todėl yra logiška tokias spalvas išdėstyti skirtingose pusėse. Trečiasis komponentas - L yra skirtas nurodyti šviesumui (angl. luminance). [TT03] [FR98] Pagrindinis jos privalumas yra tas, kad, skirtingai, nei CIE

XYZ erdvėje atstumai tarp spalvų yra panašesni į žmogaus suvokiamus spalvų skirtumus. Todėl ši erdvė tinka spalvų skirtumams įvertinti. Skirtumas tarp dviejų spalvų yra [WS00]

$$\Delta E^{Lab} = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \quad (2)$$

## 2.2. Konvertavimas

### 2.2.1. Iš RGB į CIE XYZ

Konvertavimas iš sRGB (standartizuotos RGB) į CIE XYZ reikšmes yra dviejų matricų sandauga.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3)$$

Čia  $X_R, Y_R, Z_R$  yra išmatuotos CIE XYZ reikšmės, kai raudonasis kanalas šviečia didžiausiu pajėgumu. Analogiškai yra gaunamos ir  $X_G, Y_G, Z_G$  bei  $X_B, Y_B, Z_B$  reikšmės. [FR98] Spalvų konvertavimui iš sRGB į CIE XYZ erdvę yra naudojama formulė su tokiomis matricos reikšmėmis

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4124 & 0,3576 & 0,1805 \\ 0,2126 & 0,7152 & 0,0722 \\ 0,0193 & 0,1192 & 0,9505 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4)$$

Šiuo atveju R, G ir B reikšmės turi būti nepakoreguotos gama funkcijos arba su pritaikyta atvirkštine gama funkcija kiekvina kanalui. [WS03]

$$S_{tiesin} = \begin{cases} \left( \frac{S+0,055}{1,055} \right)^{2,4} & \text{jei } S > 0,03928 \\ \frac{S}{12,92} & \text{jei } S \leq 0,03928 \end{cases} \quad (5)$$

Kadangi technikoje dažniausiai yra naudojamos sveikaskaitinės RGB reikšmės nuo 0 iki 255 imtinai, tai reikšmių vertimo iš RGB į CIE XYZ pagreitinimui galima šias reikšmes (jų yra  $255^3 = 16581375$ ) apskaičiuoti iš anksto ir saugoti atmintyje. Taip pat iš anksto galima apskaičiuoti ir laikyti atmintyje RGB reikšmes su pritaikyta atvirkštine gama funkcija.

### 2.2.2. Iš CIE XYZ į CIE L\*a\*b\*

Reikšmių konvertavimas iš CIE XYZ į CIE L\*a\*b\* erdvę yra sudėtingesnis ir daugiau resursų kainuojantis procesas.

$$L^* = 116 \cdot f\left(\frac{Y}{Y_N}\right) - 16 \quad (6)$$

$$a^* = 500 \cdot f\left(\frac{X}{X_N}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_N}\right) \quad (7)$$

$$b^* = 200 \cdot f\left(\frac{Y}{Y_N}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_N}\right) \quad (8)$$

$$f(x) = \begin{cases} x^{\frac{1}{3}} & \text{jei } x > 0.008856 \\ 7.787x + \frac{16}{116} & \text{jei } x \leq 0.008856 \end{cases} \quad (9)$$

Čia  $X_N, Y_N, Z_N$  yra santykinis baltos spalvos taškas (angl. white point). Standartinio iliuminanto  $D_{65}$  reikšmės yra  $X = 95.047, Y = 100, Z = 108.883$ . [WS00]

Jeigu yra konvertuojama iš RGB į CIE L\*a\*b\* erdvę, tai siekiant pagreitinti skaičiavimus, šiuo atveju taip pat galima iš anksto apskaičiuoti visas įmanomas ( $255^3$ ) reikšmes ir vėliau naudoti išsaugotas reikšmes.

### 3. Panašūs eksperimentai

Šiame darbe aprašytas tikslas nėra unikalus. Praeityje jau buvo atlikti panašūs eksperimentai, kurie siekė pakeisti objekto išvaizdą naudojant apšvietimą. Vieni iš jų tik šiek tiek koregavo viso paveikslo atspalvį, kiti bandė suskaldyti uždavinį į daug smulkių kvadratėlių (pikselių) ir spresti juos kaip atskiras problemas. Spalvų atstatymas naudojant apšvietimą susideda iš trijų pagrindinių dalių: norimo rezultato (tikslo) radimas, skirtumo tarp tikslo ir esamos būsenos apskaičiavimas ir restauravimas panaudojant šviesą. Kai kurie darbai [BFH13] tik aprašė matematinį modelį, skirtą spalvų restauravimui. Nors ir buvo atliktas ne vienas eksperimentas bandant restauruoti meno kūrinius pasitelkiant šviesą, tačiau šis restauravimo būdas nėra plačiai naudojamas.

#### 3.1. Pageltusio lako poveikio panaikinimas

Pirmas bandymas restauruoti spalvas naudojantis apšvietimu buvo publikuotas 1986 metais. Publikacijoje aprašomas eksperimentas, kurio metu buvo bandoma panaikinti gelsvą atspalvį, kuris atsirado dėl lako, kuriuo padengtas paveikslo paviršius. Paveiksmai yra padengiami laku siekiant užkonservuoti juos nuo neigiamo išorės poveikio. Laikui bėgant lakas patamsėja ir pageltonuoja. Jei paveikslo paviršius yra padengtas laku, kuris yra pasenęs, tai prilygsta stebėjimui pro du geltonus filtrus, nes šviesa pro laką praeina du kartus - vieną kartą judėdama iš išorės link kūrinio paviršiaus ir kitą kartą atsispindėjusi nuo paveikslo paviršiaus.

Kadangi tikslas yra pridėti šviesos energijos, buvo nuspręsta apšviesti paveikslą papildomu šviesos šaltiniu, kurio spektrinis pasiskirstymas ir stiprumas tiksliai kompensuotų tą, sugertą pageltusio lako. Tokiu būdu atstaiyti spalvas įmanoma tik su sąlyga jei lakas jokios spektro dalies nesugeria 100%. Jei kuri nors spalva lako būtų sugerta visiškai, tai apšvietimo stiprinimas tos spalvos spektre neduotų jokios naudos (nes papildoma energija vistiek būtų sugerta) ir tos spalvos atstatymas nebūtų įmanomas.

Eksperimento esmė buvo sukurti apšvietimo sistemą, kurios spektras kompensuotų lako sugeriamą spektrą. Tam buvo naudojami du modifikuoti skaidrių projektoriai. Jie turėjo galimybę keisti savo šviesos stiprumą keičiant lempos įtampą. Vienas projektorius apšvietė paveikslą balta šviesa. Antrasis projektorius buvo naudojamas kompensuojančiam spektrui gauti. Šio projektoriaus skleidžiama šviesa praeidavo pro šviesos filtrą(-us) ir apšvietė paveikslo dalį. Bandymams buvo sukurtas specialus paveikslas, nutapytas naudojant akrilinius dažus. Jis buvo sudarytas iš devynių horizontalių juostų: šviesiai mėlyna, tamsiai mėlyna, balta, šviesiai žalia,

tamsiai žalia, raudona geltona, odos spalva ir ruda. Dešinė paveikslo pusė buvo padengta skaidraus lako sluoksniu. Kairė pusė buvo padengta dirbtinai orkaitėje sendintu laku, kuris įgyjo gelsvą spalvą. Bandant rasti tinkamą apšvietimą buvo apšviečiamas tik antras vertikalus ketvirtis iš kairės (pusė paveikslo dalies, padengtos pageltusiu laku) tam, kad būtų galima matyti skirtumą tarp nerestauruotos, restauruotos ir nepažeistos paveikslo dalių.

Publikacijoje teigiama, kad atlikus bandymus su keliais paveikslais rezultatai buvo labai teigiami. Kaip sako autorius, „Atrodo, kad lakas tiesiog išnyko ir parodė spalvas, esančias po juo“. Stiprinant kompensuojantį apšvietimą buvo galima stebėti kaip po truputi išnyksta geltonas atspalvis. Vienas iš paveikslų jau turėjo dalį lako pašalinta, todėl buvo galima palyginti atstatymą apšvietimų ir pašalinimą. Tai tik patvirtino sistemos veikimą. Publikacijoje užsimenama, kad tai galėtų būti alternatyva restauravimui, nes tai yra neinvazinis (angl. non-invasive) paveikslų valymo būdas.

Eksperimento metu iškilo keli klausimai. Pirmasis buvo apie tai, kad skirtingos paveikslo dalys gali turėti skirtingo storio lako sluoksnių. Todėl viena paveikslo dalis gali būti pilnai atstatytai, o kita ne visiškai. Bandymų metu paaiškėjo, kad šios problemos nėra reikšmingos. Iš to restauratoriai netgi gali sužinoti apie lako storį dar iki pradėdant restauraciją.

Publikacijos išvadose teigiama, kad įmanoma panaikinti neigiamą pageltusio lako poveikį apšviečiant paveikslą specialia kompensuojančia šviesa. Pabrėžiama, kad skirtingais atvejais ši sistema gali iki skirtingo lygio atkurti spalvas. Tačiau testai su standartinėmis spalvomis davė įspūdingus rezultatus. Taip pat ir keli bandymai su tikrais paveikslais. Publikacijoje paminima, kad ateityje tokia sistema bus pagalbiniškas restauratoriams. [Laf86]

Šis eksperimentas turi du trūkumus, kuriuos tuomet buvo sunku išspręsti, bet dabartinės technologijos tą leidžia. Pirmasis trūkumas yra kompensuojančio apšvietimo spalvų gama. Kadangi apšvietimo spalvų sudarymui yra naudojami šviesos filtrai, galimų spalvų aibė prilygsta filtrų ir jų kombinacijų aibei. Todėl gali pasitaikyti atveju, kad neįmanoma sudaryti tiksliai tokio kompensuojančio apšvietimo spektro, koks yra reikalingas. Šią problemą galima išspręsti panaudojant daugiakanalį apšvietimą, kuris leidžia sumodeliuoti didesnę spalvų įvairovę (pavyzdžiui, jei yra naudojamas trijų kanalų apšvietimas ir kiekvienas kanalas gali įgyti 100 skirtingų reikšmių, tai bendras spektrų skaičius yra  $100^3 = 1000000$ ). Antrasis trūkumas yra tas, kad filtrai yra parenkami ranka, bandymų ir klaidų (angl. trial and error) keliu. Tam būtų galima panaudoti skaitmenines kameras, prijungtas prie kompiuterio, kurios gali nuskenuoti paveikslą ir jam parinkti atstatantį apšvietimą panaudojant kompiuteriu valdomą daugiakanalę lempą.



### 3.2. Harvardo freskų restauracija

Kitas bandymas yra publikuotas 2016 metais. Šioje publikacijoje yra aprašyta Mark Rothko paveikslų, dėl savo dydžio dar žinomų kaip Harvardo Freskos, restauracija pasitelkiant apšvietimą. Šių penkių paveikslų istorija prasideda 1963 metais, kai jie buvo padovanoti Harvardo universitetui. Buvo nuspręsta juos eksponuoti „Holyoke Center“ valgomajame. Ši patalpa turėjo didžiulius langus, pro kuriuos ant freskų krisdavo saulės šviesa. Dėl to laikui bėgant paveikslai pakeitė savo išvaizdą – tamsiai raudonos (angl. crimson) freskos dalys pakeitė spalvą į šviesiai mėlyną. Taip atsitiko todėl, nes buvo naudojamas nepastovus pigmentas (angl. fugitive pigment) – Lithol Red. Priklausomai nuo jų padėties langų atžvilgiu freskos ir netgi dalys tame pačiame paveiksle buvo veikiamos nevienodai, todėl nevienodai pakeitė savo išvaizdą. Paveikslų spalvų pokytis buvo pastebėtas gana anksti, tačiau dėl sudėtingų teisinių aplinkybių nebuvo nieko imtasi ir tik 1979 metais šios freskos buvo padėtos į tamsią vietą, norint jas apsaugoti nuo tolimesnio neigiamo poveikio.

Informacija apie tai, kaip paveikslai atrodė prieš spalvų pokytį buvo gauta iš 1964 metais padarytų paveikslų fotografijos. Tokios fotografijos restauratoriams yra labai vertingos, nes suteikia daug informacijos apie originalias spalvas ir vaizdą. Tačiau juostelė, kuri buvo naudota šiuo atveju (Ektachrome), naudojo nestabilų dažą, kurio spektras laikui bėgant pasislinko iš žydros į purpurinę ir gelsvą. Nėgana to, ši juostelė buvo skirta portretams, todėl joje atvaizduojamos spalvos yra šiltesnės, nei iš tikrųjų. Eksperimentui labai pasitarnavo ir šeštasis paveikslas, kuris nebuvo eksponuojamas, todėl ne taip stipriai pakeitė savo išvaizdą. Fotografijų juostelė buvo apšviesta raudonos, žalios ir mėlynos spalvos LED šviestukais ir nuskenuota. Šių šviestukų skleidžiamos šviesos spektro plotis yra siauras, o tai užtikrina, kad išmatuotas šviesos atspindėjimas yra proporcingas fotografinio dažo koncentracijai. Tuomet pasitelkiant žinias, gautas iš fotografijų, juostelė buvo restauruota skaitmeniniu būdu. Pradinės juostelės spalvos buvo gautos naudojantis cheminiu spalvų blukimo modeliu, kuris rėmėsi išmatuotomis dažų koncentracijomis. Patikslinimui buvo naudojama pilkos spalvos skalė ir spalvų duomenys esantys juostelėje.

Eksperimento metu spalvų restauracija skaičiuojama kiekvienam pikseliui atskirai, todėl buvo svarbu sukalibruoti kamerą ir projektorių, kad jie turėtų bendrus atskaitos taškus. Jeigu tokie taškai nebūtų rasti, o tiesiog lyginamos nuotraukos tarpusavyje, pikseliai, turintys vienodas koordinates nebūtinai reikštų tą pačią vietą paveiksluose. Kaip atskaitos taškus naudoti paveikslo kampus nebuvo galima, nes nuo 1964 metų, kai buvo padarytos nuotraukos, drobė buvo kelis kartus iš naujo ištempta. Todėl kaip atskaitos taškai buvo naudojami smulkūs fragmentai, tokie kaip dažų lašai. Radus atskaitos taškus buvo apskaičiuota geometrinė transformacija, kurią buvo

būtina pritaikyti kiekvienai iš fotoaparato gautai nuotraukai.

Iš fotoaparato gautos nuotraukos buvo palyginamos su skaitmeniniu būdu restauruota juoste ir apskaičiuojamas kompensuojantis paveikslas.

Publikacijoje paminimi ir šio sprendimo trūkumai. Aplink kiekvieną projektoriaus pikselį yra juoda linija. Tokios linijos atrodo kaip smulkus tinklelis nuo vabzdžių. Šią problemą galima išspręsti sureguliuojant projektoriaus lešius taip, kad jie būtų truputi nesufokusuoti - nuo to susilieja vaizdas ir juodų linijų nebesimato. Tačiau tai sumažina apšvietimo tikslumą. Kitas trūkumas yra susijęs su ribotu projektoriaus pikselių kiekiu. Eksperimente naudoto projektoriaus skiriamoji geba buvo  $1920 \times 1200$  pikselių. Tai reiškia, kad milimetro dydžio paveikslo fragmentai negali būti tiksliai atstatyti. Taip pat, jei pikselis uždengia kelias skirtingas spalvas, tai yra imamas spalvų vidurkis. Eksperimento metu tai nesukėlė didelių problemų ir, pasak publikacijos, turėjo labai mažą vizualinį efektą.

Publikacijoje teigiama, kad didžiausias trūkumas yra tai, kad atstatymas yra paremtas fotografijomis. Fotografijos gali būti netikslios, iškraipyti spalvas arba begant laikui pakeisti savo išvaizdą. Taip pat autoriai mini, kad jie stengėsi iš spalvų atstatymo proceso išimti žmogiškąjį faktorių. Tačiau galutinius pataisymus vistiek turėjo atlikti žmogus. Autorių nuomone tai buvo labai nedideli pakeitimai, bet jie duodavo didžiausią efektą. [SKR<sup>+</sup>16]

### **3.3. Objektų išvaizdos keitimas naudojant projektorių (2004)**

Trečiasis eksperimentas šiek tiek skiriasi nuo pirmų dviejų. Šio eksperimento tikslas buvo ne atstatyti spalvas, o visiškai pakeisto objekto išvaizdą naudojant apšvietimą. Eksperimento principas yra toks pats kaip ir Harvardo Freskų spalvų atstatymo eksperimento. Kaip ir antrajame eksperimente buvo naudojama kameros, kompiuterio ir projektoriaus sistema. Pirmiausia sistema buvo sukalibruojama nustatant bendrus taškus tarp kameros ir projektoriaus. Tuomet buvo gaunamas objekto vaizdas naudojant kamerą ir siunčiamas į kompiuterį. Kompiuteris apskaičiuodavo kompensuojantį paveikslą, kurį uždėjus ant objekto šis įgytų pageidaujamą išvaizdą. Tuomet kompiuteris naudodamas projektorių suprojektuodavo vaizdą ant objekto.

Vienas iš eksperimento metu naudotų objektų buvo dėžė su įspėjamaisiais ženklais. Apšvietus šią dėžę kompensuojančiu apšvietimu ženklai nebuvo matomi ir dėžė atrodė balta. Ant dėžės taip pat pavyko suprojektuoti keletą skirtingų atvaizdų visiškai pakeičiant jos išvaizdą. Kitas objektas buvo gaublys. Apšvietus kompensuojančiu apšvietimu gaublio paviršius tapo baltas. Apšvietimas tarsi nutrynė dažus nuo gaublio. Vėliau šiek tiek pakeitus kompensuojantį apšvietimą gaublio paviršius atrodė kaip futbolo kamuolys - baltas su juodais (šiu atveju pilkais)

penkiakampiais.

Vienas iš eksperimento trūkumų yra mažos raiškos įrenginiai. Taip yra todėl, nes eksperimentas buvo publikuotas 2004 metais. Skaitmeninės kameros raiška buvo  $640 \times 480$  pikselių, o projektoriaus raiška -  $800 \times 600$  pikselių. Kitas trūkumas yra tas, kad išvaizda pakeičiama ne idealiai. Gerai išsižiūrėjus galima matyti pirminio objekto paviršiaus išvaizdą. [GPN<sup>+</sup>04]

### **3.4. Objektų išvaizdos keitimas naudojant projektorių (2013)**

Šis eksperimentas, panašiai kaip Objektų išvaizdos keitimas naudojant projektorių (2004) naudoja kamerą ir projektorių objekto išvaizdos keitimui. Skirtingai nei prieš tai aprašytame eksperimente, išvaizda nebuvo keičiama iš vienokios į kitokią, o tik manipuluojama spalvomis. Taip pat buvo naudojama kitokia, nei kituose eksperimentuose kameros ir projektoriaus sistema. Kamera ir projektorius buvo sumontuoti taip, kad jų lešiai buvo vienoje linijoje. Dėl to nereikėjo pritaikyti geometrinės transformacijos, kuri reikalinga kai projektoriaus ir kameros lešiai yra šalia vienas kito. Tai buvo pasiekta naudojant vienpusį veidrodį, kuris iš vienos pusės veikia kaip veidrodis, o iš kitos kaip stiklas (neatspindi šviesos, o ją praleidžia). Veidrodis buvo pakreiptas  $45^\circ$  projektoriaus atžvilgiu ir projektoriaus šviesą nukreipdavo  $90^\circ$  kampu. Kamera buvo sumontuota už veidrodžio, statmenai projektoriui.

Eksperimento metu sėkmingai pavyko apšviesti objektus projektoriumi ir pakeisti jų išvaizdą paryškinant spalvas. Taip pat naudojant apšvietimą buvo manipuluojama objektų išvaizdą keičiant jų kontrastą ir blizgesį. Įdomiausia dalis buvo objektų pavertimas permatomais. Panaudojus tokį apšvietimą buvo paryškinami objekto kontūrai, o patys objektai atrodydavo permatomi.

Skirtingai nei prieš tai aprašytame eksperimente, šiame buvo naudojama didesnės raiškos įranga: kameros raiška  $1600 \times 1200$  pikselių, o projektoriaus raiška  $1920 \times 1080$  pikselių. [Ama13]

### **3.5. Virtuali spalvų rekonstrukcija realiams paveikslams naudojant apšvietimą**

Eksperimentas savo tikslu ir įgyvendinimu yra panašus į Harvardo freskų restauraciją. Šiame eksperimente taip pat buvo naudojama kameros, kompiuterio ir projektoriaus sistema. Skirtingai nei Harvardo freskų restauracijos eksperimente, šiame eksperimente naudota sistema turėjo vartotojui patogią grafinę sąsają, kurioje jis iš karto matė originalų vaizdą, norimą vaizdą,

kuri galėjo redaguoti ir kompensuojantį paveikslą, kuris bus projektuojamas ant originalaus vaizdo. Eksperimentas buvo atliktas su Vincento van Gogo paveikslu (menininko motinos portretu). Rezultatas buvo išblukęs paveikslas, kuris apšviestas kompensuojančiu apšvietimu buvo labai panašus į užduotą atvaizdą. Kompensuojanti apšvietimas paryškino ir pakoregavo meno kūrinyje esančias spalvas. Darbe taip pat pateikiama lentelė su spalvomis ir jų RGB reikšmėmis, kurioje yra įrašas susideda iš originalios spalvos, kompensuojančios spalvos ir gautos spalvos. Išanalizavus lentelę galima teigti, kad nors ir reikšmės nesutampa idealiai, tačiau susidaro įspūdis, kad jos yra ganėtinai artimos. Norint tiksliai įvertinti jų skirtumus, lentelės rezultatus reikėtų transformuoti į CIE  $L^*a^*b^*$  erdvę, nes RGB erdvė nėra tinkama vertinti spalvų skirtumui. [YHS13]

### 3.6. Skaitmeninis senų paveikslų spalvų atstatymas

Eksperimentas buvo atliktas 2000 metais. Darbo tikslas yra virtualiai atstatyti senų, išblukusių, purvinių ar kitų paviršiaus pažeidimų turinčių paveikslų išvaizdą. Eksperimentas remiasi nerestauruotų ir restauruotų spalvų lyginimu. Spalvų skirtumų radimui buvo pasirinkta CIE  $L^*a^*b^*$  erdvė dėl savo savybės skirtumus tarp spalvų atvaizduoti panašiai į žmogaus juntamus skirtumus tarp spalvų. Buvo išbandyti penki metodai:

1. Imties vidurkių lyginimas (angl. Sample Mean Matching). Paprasčiausias būdas, kuomet yra paimami nerestauruotų ir restauruotų spalvų vektoriai, apskaičiuojamas skirtumas tarp jų ir pritaikomas (pridedamas) kitoms nerestauruotoms spalvoms. Straipsnio autorių teigimu nors būdas atrodo paprastas, tačiau veikia stebėtinai gerai.
2. Tiesinė aproksimacija (angl. Linear Approximation). Šiame metode spalvos vektorius yra dauginamas iš vienetinės ir  $3 \times 3$  koeficientų matricos sumos.
3. Arčiausio taško aproksimacija (angl. Iterative Closest Point Approximation). Šiame metode spalvos vektorius yra dauginamas iš  $3 \times 3$  posūkio matricos ir prie jo pridedama  $3 \times 1$  postūmio matrica. Autorių teigimu kadangi šiam metodui reikia daug skaičiavimų ( $O(N^2)$ ), jis netinka uždaviniams, kur duomenų aibė yra didelė. Dėl šios priežasties yra naudojama greitesnė algoritmo implementacija.
4. Baltos spalvos taško transformacija (angl. White Point Transformation). Yra lyginami baltos spalvos atskaitos taškai ir jų skirtumas imamas kaip nuoroda kaip transformuoti kitas spalvas. Autorių teigimu šio metodo privalumas yra tas, kad jo algoritmas yra greitas. Taip pat toks metodas yra naudojamas spręsti kalibravimo problemas.

5. RBF aproksimacija (angl. RBF Approximation). Šis metodas naudoja radialines bazines funkcijas (angl. radial basis functions) atstatytų spalvų aproksimacijai.

Metodų tikslumas tarpusavyje buvo vertinamas lyginant jų vidutinės kvadratinės paklaidos (angl. Mean Squared Error, MSE) vertes

$$MSE \simeq \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \|s_n - \hat{s}_n\|^2, \quad (10)$$

Kur  $N$  yra imties dydis,  $s$  yra originali spalva,  $\hat{s}$  yra atstatyta spalva, o  $\|\dots\|$  yra euklidinis atstumas. Metodų palyginimas pateiktas 1 lentelėje.[PP00]

1 lentelė. Spalvų atstatymo metodų palyginimas

Metodas	MSE
Imties vidurkių lyginimas	0
Tiesinė aproksimacija	93,21
Arčiausio taško aproksimacija	369,58
Baltos spalvos taško transformacija	190,37
RBF (viena Gauso funkcija kanalui)	126,46
RBF (dvi Gauso funkcijos kanalui)	88,3

### 3.7. LED šviestukų panaudojimas muziejaus eksponatų spalvų paryškiniui

Šio eksperimento metu buvo nagrinėjama galimybė naudoti LED šviestukus spalvų koregavimui. Kitaip, nei kituose aprašytuose eksperimentuose, šiame nebuvo naudojami projektorius ir kamera.

Buvo atspausdinti du lapai su 36 skirtingomis pastelinėmis spalvomis, išsidėsčiusiomis ratu CIE L\*a\*b\* spalviniame žemėlapyje. Vienas lapas buvo laikomas tamsoje, apsaugotas nuo išorinių poveikių. Kitas lapas buvo dirbtinai pasendintas naudojant stiprų apšvietimą (60000lx). Sendinimas truko dvi dienas. Po šio proceso matėsi akivaizdus skirtumas tarp dviejų lapų. Sendintame lape esančios spalvos buvo išblukusios. Išmatavus abiejų lapų spalvas, jos buvo atidėtos CIE L\*a\*b\* spalviniame žemėlapyje. Kaip ir pradinės spalvos, sendintos spalvos buvo išsidėsčiusios ratu aplink koordinatinių pradžių tašką. Tačiau sendintos spalvos buvo arčiau koordinatinių pradžių taško, tai yra, buvo ne tokios sodrios (kuo spalva CIE L\*a\*b\* žemėlapyje toliau nuo centro, tuo ji sodresnė). Visos spalvos pasislinko maždaug po tiek pat ir išblukusių spalvų ratukas atrodo lyg sumažinta didžiojo ratuko versija.

Eksperimento metu bandiniai buvo apšviesti penkiais skirtingais apšvietimais: baltos spalvos LED šviestukais (kontrolinis bandinys), balta spalva, sudaryta iš RGB (raudonų, žalių ir mėlynų) šviestukų, balta spalva, sudaryta iš RCB (raudonų, žydrų ir mėlynų) šviestukų, balta spalva, sudaryta iš AGB (gintarinių, žalių ir mėlynų) šviestukų, balta spalva, sudaryta iš ACB (gintarinių, žydrų ir mėlynų) šviestukų.

Apšviestų pavišių reikšmės taip pat buvo išmatuotos ir atidėtos CIE L\*a\*b\* spalviniame žemėlapyje kartu su nerestauruotomis (išblukusių spalvų) reikšmėmis. Buvo pastebėta, kad apšviesti bandiniai skyla į dvi grupes: RGB ir RCB šviestukais apšviestų bandinių sodrumas padidėjo raudonojoje ir žydrojoje zonoje, kai tuo tarpu AGB ir ACB apšviestų bandinių sodrumas sumažėjo visose, išskyrus žydrąją, zonose.

Kitas eksperimentas buvo apklausos darymas. Iš 36 bandinių buvo paimti 8, kurie nebuvo pakeitę savo spalvos, tai yra, buvo tik išblukę Tuomet buvo pakviesti 20 žmonių, jiems paaiškinta spalvų teorija, susijusios sąvokos tam, kad žmonės galėtų susidaryti savo subjektyvią spalvų sodrumo skalę. Dalyviams buvo rodomi išblukę bandiniai apšviesti įvairia šviesa: RGB, RCB, AGB, ACB. Tam, kad respondentai turėtų atskaitos tašką, tarp šių keturių spalvų bandinys buvo apšviestas paprastu baltu apšvietimu, tai yra viena iš sekų atrodė taip: paprastas → RGB → paprastas → RCB → paprastas → AGB → paprastas → ACB. Kitoje sekoje keturi apšvietimai buvo naudojami priešinga tvarka. Buvo paprašyta žmonių įvertinti spalvingumą nuo 0 iki 10, jei paprastu apšvietimu apšviesto bandinio spalvingumas yra 5. Kiekvienas dalyvis pateikė po 32 įvertinimus. Šie įvertinimai buvo sunormalizuoti ir suvidurkinti. Rezultatai parodė, kad RGB ir RCB šviestukai padidino bandinių spalvingumą, kai tuo tarpu AGB ir ACB šviestukai sumažino.

Išvadose teigiama, kad įmanoma padidinti nedaug pažeistų bandinių spalvingumą naudojant trijų spalvų LED apšvietimą. Tai yra pasiekama koreguojant apšvietimo spektrą, tačiau kartu išlaikant baltą apšvietimo spalvą. Taip pat žinant konkrečius atvejus, galima naudoti labiau optimizuotų spalvų LED šviestukus. Atkreipiamas dėmesys į tai, kad nors ir nėra įrodyta, kad LED apšvietimas nekenkia apšviestiems objektams, tačiau faktas, kad LED šviestukai neskleidžia infraraudonosios ir ultravioletinės spinduliuotės yra didelis privalumas. Kaip kitas privalumas yra paminima, kad restauravimas apšvietimu fiziškai nekeičia objekto paviršiaus. Taip pat paminima, kad kol vienos spalvos paviršius yra atstatomas, kitos spalvos paviršius gali įgauti nepageidaujamą spalvos pokytį. [VCL11]

### 3.8. Spektrinis žalos modelis

Šiame darbe nagrinėjama šiek tiek kitokia problema, nei iki šiol aprašytuose šaltiniuose. Yra kalbama apie tai, kaip parodose esantis apšvietimas gali daryti žalą meno kūriniam. Darbe atkreipiamas dėmesys į vieną detalę: kai šviesa krinta ant paviršiaus, tik sugerta spinduliuotė daro žalą. Atspindėta šviesa žalos nedaro.

Eksperimentas buvo atliktas su 39 dažais: 23 aliejiniai, 9 akriliniai ir 7 gvašiniai dažai. Dažai buvo plonu sluoksniu uždėti ant stiklo gabaliukų. Prieš atliekant eksperimentą, nudažyti stiklo gabaliukai buvo laikomi 9 mėnesius tam, kad išdžiūtų. Prasidėjus eksperimentui, stiklo gabaliukai buvo apšviesti LED šviestukais ir laikomi ilgą laiką. Buvo matuojamos bandinių spalvos. Spalvų skirtumai apskaičiuoti naudojantis CIE  $L^*a^*b^*$  spalvų atstumo formule.

Atlikus matavimus buvo pastebėta, kad eksperimento pradžioje spalvos keitėsi labiau, nei gale. Spalvų pokytis grafike primena hiperbolę. Rezultatai taip pat rodo, kad iš trijų dažų rūšių labiausiai kito aliejinių dažų spalvos, mažiau akrilinių dažų ir žymiai mažiau gvašinių dažų spalvos. Atlikus šį eksperimentą buvo sukurtas matematinis modelis, kuris leidžia apskaičiuoti kaip vienoks ar kitoks apšvietimas pažeidžia paveikslų paviršių ir pakeičia spalvas. Naudojantis šiuo modeliu taip pat galima apskaičiuoti kiek laiko paveikslas gali būti apšviestas, kad jo paviršiaus pokyčiai nebūtų pastebimi paprasto stebėtojo. [PVF<sup>+</sup>16]

## 4. Optimizavimo uždavinio sprendimas

### 4.1. Optimizavimo problema šiame darbe ir uždavinio formulavimas

Šiame darbe siekiama, kad bendras spalvų skirtumas būtų kuo mažesnis, tai yra, spalvos atkurtos kuo tiksliau. Skirtumus tarp spalvų imant kaip tikslo funkciją, kurią reikia optimizuoti, šis darbas susiveda į globalaus optimizavimo [TŽ89], o tiksliau - į minimizavimo uždavinį. Uždavinys turi tiek nežinomųjų, kiek skirtingų spektrų šviestukų turi apšvietimo įrenginys. Reikia rasti tokius atskirų šviestukų stiprumo koeficientus, kad jais apšvietus paviršių, šis kuo labiau būtų panašus į originalųjį (nepažeistą) paviršių.

### 4.2. Skirtumo tarp dviejų spalvų įvertinimas

Optimizavimo uždavinio sprendimui yra būtinas optimizavimo kriterijus. Kadangi šiame darbe bus bandoma atstatyti spalvas, sprendinio tikslumas gali būti matuojamas originalios ir atstatytos (naudojant apšvietimą) spalvų skirtumu. Spalvų skirtumą galima matuoti kaip atstumą tarp dviejų spalvų CIE  $L^*a^*b^*$  erdvėje. CIE  $L^*a^*b^*$  erdvė tokiam tikslui yra tinkama, nes atstumai tarp spalvų šioje erdvėje yra panašūs į žmogaus suvokiamus spalvų skirtumus. Dviejų spalvų skirtumo formulė CIE  $L^*a^*b^*$  erdvėje yra aprašyta 2.1.3 skyriuje. Tačiau nebūtina apsiriboti tik atstumu CIE  $L^*a^*b^*$  erdvėje. Taip pat galima matuoti ir atstumą CIE  $L^*a^*b^*$  projekcijoje į  $a^*b^*$  plokštumą (ignoruoti šviesio poslinki, vertinti tik spalvos atstatymą) arba ignoruoti sodrį (atstumas nuo koordinatų pradžios taško) ir stengtis atstatyti atspalvį.

### 4.3. Minimizavimo metodai

Optimizavimo uždaviniai nėra nauja matematikos sritis. Tokiems uždaviniams spręsti yra sukurtas ne vienas algoritmas. Kiekvienas iš jų skiriasi pagal tai, kokie yra keliami reikalavimai funkcijoms ir duomenims. Šiame etape darbo tikslas yra ne konkretaus optimizavimo metodo nagrinėjimas, o uždavinio sprendimas, todėl šiame darbe stengiamasi neprisirišti prie konkretaus metodo ir jį nagrinėti, o tik pasitelkti minimizavimo algoritmą kaip įrankį sprendžiant didesnę problemą. Dėl to paties tikslo nėra poreikio nagrinėti sudėtingus metodus, užteks ir paprasto jei jis veiks pakankamai greitai ir užtikrins pakankamą tikslumą.



#### 4.4. Nelder-Mead metodas

Minimizavimo uždaviniams su  $n$  nežinomųjų spręsti yra naudojamas deformuojamo simplekso metodas dar vadinamas Nelder-Mead metodu. Šis metodas remiasi simplekso, esančio  $n$ -matėje erdvėje „vartymu“ ir deformavimu. Simpleksas juda link lokalaus minimumo taško ir mažėja. Kai atstumai tarp simplekso viršūnių tampa norimai maži, laikoma, kad yra rastas minimumo taškas. Nelder-Mead algoritmo privalumas yra skaičiavimų paprastumas, nes nereikia skaičiuoti funkcijos išvestinių. Algoritmas naudoja tik funkcijos reikšmes įvairiuose taškuose. Nelder-Mead metodo algoritmas [CŽ13] funkcijos

$$f(x), x \in \mathbb{R}^n$$

minimizavimui:

0. Sudaromas simpleksas iš  $n + 1$  viršūnės. Simplekso dydi nurodo mastelio koeficientas  $\alpha$ .

Viršūnes galima inicializuoti paėmus bazinę viršūnę  $X_0$  ir apskaičiuojant likusias viršūnes pagal formulę:

$$X_i = \begin{cases} X_{0j} + \delta_1 & jei j \neq i \\ X_{0j} + \delta_2 & jei j = i \end{cases} \quad (11)$$

$$\delta_1 = \frac{\sqrt{n+1} + n - 1}{n\sqrt{2}}\alpha \quad \delta_2 = \frac{\sqrt{n+1} - 1}{n\sqrt{2}}\alpha \quad (12)$$

1. Apskaičiuojama  $f(X)$  reikšmė kiekvienoje viršūnėje. Viršūnės surikiuojamos taip, kad

$$f(X_0) \leq f(X_1) \leq \dots \leq f(X_n)$$

Viršūnė  $X_0$  bus laikoma geriausia, o  $X_n$  - blogiausia, nes uždavinio tikslas yra rasti mažiausią funkcijos reikšmę, o  $f(X_0)$  yra arčiausiai tikslo. Viršūnė  $X_0$  pažymima  $X_s$  (smallest),  $X_{n-1}$  pažymima  $X_{nl}$  (next largest) ir  $X_n$  pažymima  $X_l$  (largest).

2. Skaičiuojamas  $n$  geriausių viršūnių svorio centras (aritmetinis vidurkis)

$$X_g = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n X_i \quad (13)$$

3. Randamas blogiausios viršūnės  $X_l$  atspindys  $X_r$  svorio centro  $X_g$  atžvilgiu. Atspindžio

koeficientas  $\rho > 0$  dažniausiai yra lygus 1.

$$X_r = X_g + \rho(X_g - X_l) \quad (14)$$

4. Apskaičiuojama funkcijos reikšmė atspindžio taške  $f(X_r)$ .
5. Jei  $f(X_r) < f(X_s)$ , tuomet reiškia, kad atspindžio taške yra pati mažiausia iki šiol apskaičiuota  $f(X)$  reikšmė. Daroma prielaida, kad yra judama tinkama kryptimi (kur reikšmės mažesnės, nei žinomos iki šiol). Tuomet yra daromas simplekso išplėtimas (angl. expansion) į tą pusę

$$X_e = X_g + \xi(X_r - X_g) \quad (15)$$

Kur  $\xi$  yra išplėtimo koeficientas ir  $\xi > 1$  (dažniausiai  $\xi = 2$ ).

- (a) Jei  $f(X_e) < f(X_r)$ , tuomet laikoma, kad išplėtimas buvo sėkmingas, viršūnė  $X_l$  yra pakeičiama viršūne  $X_e$  ir grįžtama į 1 žingsnį.
- (b) Jei  $f(X_e) \geq f(X_r)$ , tuomet laikoma, kad išplėtimas buvo nesėkmingas, viršūnė  $X_l$  yra pakeičiama viršūne  $X_r$  ir grįžtama į 1 žingsnį.
6. Jei  $f(X_s) \leq f(X_r) < f(X_{nl})$ , tai viršūnė  $X_l$  yra pakeičiama viršūne  $X_r$  ir grįžtama į 1 žingsnį.
7. Jei  $f(X_r) \geq f(X_{nl})$ , tuomet reiškia, kad apskaičiuotas atspindžio taškas yra toli nuo tikslo ir  $X_l$  keisti į  $X_r$  nebus prasminga. Tokiu atveju reikia daryti simplekso suspaudimą (angl. contraction) tolyn nuo blogos viršūnės. Suspaudimo dydį nurodo suspaudimo koeficientas  $\gamma$ , kuris yra  $0 < \gamma < 1$ , pvz  $\gamma = 0,5$ . Nauja (suspaudimo) viršūnė yra apskaičiuojama taip

- (a) Jei  $f(X_r) < f(X_l)$ , tuomet vykdomas išorinis suspaudimas (angl. outside contraction)

$$X_c = X_g + \gamma(X_r - X_g) \quad (16)$$

- (b) Jei  $f(X_r) \geq f(X_l)$ , tuomet vykdomas vidinis suspaudimas (angl. inside contraction)

$$X_c = X_g + \gamma(X_l - X_g) \quad (17)$$

Jei  $f(X_c) \leq f(X_l)$ , tuomet yra laikoma, kad suspaudimas buvo sėkmingas, viršūnė  $X_l$  yra pakeičiama viršūne  $X_c$  ir grįžtama į 1 žingsnį. Tačiau jei  $f(X_c) > f(X_l)$ , tai reiškia,

kad suspaudimas nebuvo sėkmingas. Tokiu atveju yra konstruojamas naujas simpleksas aplink viršūnę  $X_s$ . Viršūnė  $X_s$  yra paliekama savo vietoje, bet yra per pusę sumažinami atstumai iki kitų viršūnių. Tai yra vadinama simplekso susitraukimu (angl. shrinkage). Susitraukimo dydis yra nurodomas koeficientu  $\delta$  ir yra fiksuotas  $\delta = 0,5$ . Naujos  $n$  viršūnių yra apskaičiuojamos

$$Y_i = X_s + \delta(X_i - X_s), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

Naujas simpleksas atrodo taip

$$X_0, Y_1, Y_2, \dots, Y_n.$$

Grįžtama į 1 žingsnį.

Kiekvieno ciklo pradžioje arba pabaigoje reikia patikrinti ar simpleksas dar netapo tenkinančiai mažo dydžio. Vienas iš būdų tą padaryti yra apskaičiuoti funkcijos  $f(X)$  reikšmių simplekso viršūnėse standartinį nuokrypį  $\sigma$ .

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (f(X_i) - \mu)^2}, \quad \text{kur } \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n f(X_i) \quad (19)$$

Ir palyginti jį su iš anksto užduota maža reikšme  $\epsilon$ , pvz  $\epsilon = 0,00001$ . Jei standartinis nuokrypis yra mažesnis už  $\epsilon$ , galima laikyti, kad minimumo taškas yra rastas, nes funkcijos reikšmė simplekso viršūnėse susikoncentravo aplink vieną reikšmę. Tuomet minimumo tašku laikoma simplekso viršūnė, kurioje funkcijos  $f(X)$  reikšmė yra mažiausia.

## 4.5. Galimų reikšmių apribojimas

Sprendžiant realius optimizavimo uždavinius svarbu atsižvelgti į tai, ar tarpinės ir galutinės reikšmės netampa neįmanomomis arba neleistinomis. Pavyzdžiui, skaičiuojant didžiausią galimą dėžės tūrį reikia atsižvelgti į tai, kad medžiagų, skirtų dėžės gamybai kiekis yra ribotas. Šiuo tikslu reikia įvesti apribojimus, kurių algoritmas laikysis sprendimo eigoje.

Vienas iš paprasčiausių būdų yra funkcijos skaičiavime įvesti patikrinimą ar visi funkcijos argumentai tenkina iš anksto užduotas ribas. Jei bent vienas argumentas nepatenka į leistinus rėžius, funkcija turėtų gražinti tokią reikšmę, kuri būtų nepalanki sprendimui, pavyzdžiui didelę fiksuotą reikšmę. Teoriškai tokia reikšmė galėtų būti begalybė. Praktiškai (pvz. rašant kompiuterinę programą) begalybe galima laikyti maksimalią naudojamo duomenų tipo reikšmę.

$$f(X) = \begin{cases} f(X) & \text{jei visos } X \text{ reikšmės yra leistinos} \\ \infty & \text{jei bent viena } X \text{ reikšmė netenkina apribojimų} \end{cases} \quad (20)$$

Geresnis variantas yra išlaikyti funkciją tolygią ir neleistas reikšmes versti blogesnėmis (didesnėmis, nepalankesnėmis) reikšmėmis nepertraukiant funkcijos, pavyzdžiui, norint apriboti, kad funkcija  $f(x) = x$  rastų mažiausią reikšmę tarp neneigiamų  $x$ , galima įvesti tokį apribojimą:

$$f(x) = \begin{cases} f(x) & \text{jei } x \geq 0 \\ -f(x) & \text{jei } x < 0 \end{cases} \quad (21)$$

Kadangi Nelder-Mead metode esantis simpleksas juda link mažų funkcijos reikšmių, o suradęs didesnę, nei iki šiol žinoma, nuo jos traukiasi, tai sustabdytą simpleksą nuo viršūnių perstatymo į draudžiamą reikšmių aibę.

## 5. Spalvų atstatymo simulatorius

Atstatančio apšvietimo eksperimentams atlikti buvo parašytas simulatorius - programa, kuri, panaudojus teorines žinias apie šviesos šaltinio ir atspindžių spektrus, gali simuliuoti paviršiaus apšvietimą ir kelių šviesos šaltinių sudėtį. Tačiau pagrindinė simulatoriaus užduotis yra išspręsti optimizavimo uždavinį ir rasti tiksliausiai atstatantį apšvietimą pagal duotus pradinius ir pasendintus bandinius. Simulatorius yra parašytas Java programavimo kalba ir naudoja tik standartines bibliotekas. Atstatančio apšvietimo galima ieškoti ne tik vienam, bet ir keliems spalviniams bandiniams vienu metu. Sprendžiant optimizavimo uždavinį, galima naudoti kelias skirtingas klaidos įvertinimo funkcijas - atstumas  $L^*a^*b^*$  erdvėje, atstumas  $L^*a^*b^*$  projekcijoje į  $a^*b^*$ , atspalvio (kampas aplink koordinačių pradžios tašką) skirtumas, sodrio (atstumas nuo koordinačių pradžios taško) skirtumas. Atstatančio apšvietimo paieškai sprendžiant optimizavimo uždavinį buvo pasitelktas Nelder-Mead algoritmas, aprašytas 4.4 skyriuje. Simuliatoriuje naudojamas spektras - nuo 390nm iki 830nm. Norint šias ribas išplėsti, reikėtų papildyti programoje esančią spalvinės atitikties funkcijos (angl. color matching function) lentelę.

### 5.1. Įvestis ir išvestis

Simulatoriaus įvestis susideda iš dviejų dalių: informacijos apie šviestukus (atskirus apšvietimo kanalus) ir informacijos apie paviršiaus spalvas. Šviestukų spektrai yra pateikiami kaip lentelė, kurioje surašyta galia  $\mu W$  kiekvienam bangos ilgiui. Informacija apie paviršius yra pateikiama kaip lentelė, kurioje yra nurodytas šviesos atspindžio koeficientas (0-100%) priklausomai nuo bangos ilgio.

Šio darbo metu programoje simuliuojamas apšvietimas buvo sudarytas iš 10 nepriklausomai valdomų spalvinių kanalų, atitinkančių rinkoje prieinamų šviestukų smailių bangines pozicijas. Kanalai: gintarinis, mėlynas, žydras (angl. cyan), tamsiai raudonas (angl. deep red), žalias, laimo (angl. lime) spalvos, oranžinis, raudonas, karališkas mėlynas (angl. royal blue) ir baltas (4000K). Taip pat yra įvestas nepriklausomas nuo eksperimentų ir pradinių duomenų apšvietimas - D65. D65 apšvietimo Y komponentė CIE XYZ erdvėje yra lygi  $Y = 100$ .

Darbe naudojami paviršių duomenys yra gauti iš VU tyrėjų tirtų spalvinių bandinių. Bandinių kiekis - 25. Bandiniai yra sužymėti B0, B1, ..., B24. Originalaus eksperimento metu bandiniai buvo dirbtinai sendinami laboratorijos sąlygomis, apšviečiant juos UV apšvietimu. Spalvų spektrai buvo išmatuoti 0 (eksperimento pradžioje, 1 paveikslėlis), 3, 11, 28, 77 ir 153 (2 paveikslėlis) dieną. Šiame darbe bus atliekami bandymai imant 0 ir 153-os dienos bandinius.

Jeigu pavyktų atstatyti labiausiai pasendintų paviršių spalvas, galima daryti prielaidą, kad pavyktų atstatyti ir mažiau pasendintų paviršių spalvas.



1 pav. Spalviniai bandiniai, apšviesti D65 eksperimento pradžioje



2 pav. Spalviniai bandiniai, apšviesti D65 eksperimento pabaigoje (153 dieną)

Programos išvestis gali būti atstatančio apšvietimo kanalų stiprumo koeficientai, apšvietimų ir apšviestų paviršių CIE XYZ,  $L^*a^*b^*$ , RGB koordinatės, taip pat apšviestus paviršius galima išsaugoti kaip png formato paveikslukus, kad rezultatus būtų galima įvertinti ne tik skaitiškai, bet ir vizualiai.

Simuliacijoje buvo įvesta galimybė įjungti apribojimą, kad šviestukų intensyvumas neviršytų 100%. Jei šis apribojimas yra įjungtas ir paviršiaus atspindys žymiai suprastėjo ir spalva tapo tamsesnė, simulatorius negalės atstatyti šviesio. Dėl to patamsėjusios spalvos gali būti tinkamai atstatytos spalvingumo, tačiau ne šviesio prasme. Toks apribojimas yra prasmingas, jei simulatorius yra naudojamas realiomis sąlygomis, kur šviesos šaltinio išteklių nėra begalinis - maksimali galia yra fiksuotas įrangos parametras. Teoriniams eksperimentams šis apribojimas yra išjungtas.

## 5.2. Veikimo principas

Kuomet yra simuliuojamas paviršiaus apšvietimas, kiekvienam apšvietimo kanalui yra apskaičiuojama atsispindėjusios šviesos galia pagal paviršiaus atspindžio koeficientą kiekvienam bangos ilgiui. Jei vienu metu yra naudojami keli apšvietimo kanalai, jų skleidžiama galia yra sudedama. Simulatorius gali atspindėti šviesos srautą nuo paviršiaus ir gauti naują šviesos srautą arba sudėti kelis šviesos srautus (sudėti galingumus kiekvienam bangos ilgiui). Eksperimentams atlikti ir rezultatams palyginti, buvo pridėtas atskiras apšvietimo šaltinis - D65 spinduolis. Simuliacijos patikrinimui buvo sukurti specialūs paviršiaus modeliai, kurie atspindi 100% ir 18% krintančios šviesos. Apšvietus pastarąjį paviršių, atspindėto apšvietimo šviesumo komponentės  $L^*$  reikšmė  $L^*a^*b^*$  erdvėje yra lygi 50/100.

Minimizavimas yra pradedamas nuo apšvietimo, sumodeliuoto iš duotų šviestukų, kuris yra kiek įmanoma artimas D65 apšvietimui. Tokiu atveju, pagal naudojamą klaidos įvertinimo funkciją, surastas atstantysis apšvietimas bus neblogesnis, nei apšviestas pradine spalva, tai yra, spalvų atstatymas jų dar labiau neiškraipys. Jei bus atstatomos kelios spalvos vienu metu, prieš tai išreikštas sakinytis galioja vertinant visas derinio spalvas iš karto, o ne kiekvieną atskirai.

### 5.3. Klaidos įvertinimo funkcijos

Spalvų atstatymo apšvietimu eksperimentas susiveda į optimizavimo, o tiksliau - minimizavimo uždavinį. Klaidos įvertinimo funkciją spalvų atstatymui galima suformuluoti įvairiais būdais, priklausomai nuo to, pagal kuriuos kriterijus yra bandoma minimizuoti. Jeigu naudojant kurią nors klaidos įvertinimo funkciją minimizavimo uždavinys pasirodo neišsprendžiamas ar per sunkus, galima priimti kompromisą ir vertinti naudojant mažiau kintamųjų - atributų. Tokiu atveju nukenčia absoliutūs rezultatai, tačiau tai nebūtinai reiškia, kad vizualus nuostolis bus didelis ar net iš viso pastebimas. Žmogaus rega yra skirtingai jautri įvairiems iškreipymams, pavyzdžiui, jei bus iškreipytas atspalvis, stebimas objektas gali tapti neatpažįstamu, tačiau jei pakis šviesis, tai nebus esminis pokytis stebėtoju. Intuityviai kyla prielaida, kad naudojant mažiau griežtą klaidos įvertinimo funkciją, ji pateiks aukštesnius dalinius, tačiau žemesnius absoliučius rezultatus.

Kuomet bus bandoma atstatyti daugiau, nei vieną spalvinį bandinį vienu metu, kaip klaidos įvertinimo funkcija bus panaudota vidutinės kvadratinės klaidos šaknis (angl. root mean squared error - RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \Delta E_i^2} \quad (22)$$

kur  $\Delta E$  yra skirtumas tarp spalvų vertinant pasirinktu būdu,  $n$  - bandinių skaičius.

#### 5.3.1. Klaidos įvertinimas $L^*a^*b^*$ erdvėje

Paprasčiausias dviejų spalvų skirtumas yra euklidinis dviejų spalvų atstumas  $L^*a^*b^*$  erdvėje (2 formulė). Šiame skirtumo skaičiavime nėra daromi jokie kompromisai ir nėra išmetama nei viena komponentė. Skaičiuojant euklidinį atstumą yra atsižvelgiama į visus tris spalvos atributus: atspalvį, šviesį ir sodrį. Klaidos įvertinimo funkcija, naudojanti šį skirtumo skaičiavimo būdą atrodo taip:

$$RMSE^{Lab} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \sqrt{(L'_i - L''_i)^2 + (a'_i - a''_i)^2 + (b'_i - b''_i)^2}} \quad (23)$$

kur  $L'$ ,  $a'$ ,  $b'$  yra pradinio bandinio, apšviesto D65 spinduoliu, komponentės, o  $L''$ ,  $a''$ ,  $b''$  yra pasendinto bandinio, apšviesto atstatančiuoju apšvietimu, komponentės,  $n$  - bandinių skaičius.

### 5.3.2. Klaidos įvertinimas a\*b\* projekcijoje

$L^*a^*b^*$  projekcijoje į  $a^*b^*$  yra atsisakoma šviesio komponentės. Tuomet yra skaičiuojamas euklidinis atstumas  $a^*b^*$  plokštumoje. Iš visų trijų komponentių, šviesis turi mažiausią įtaką spalvos suvokimui, todėl jo ignoravimas yra mažiausia galima žala. Klaidos įvertinimo funkcija vertina tik atspalvį ir sodrį:

$$RMSE^{ab} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \sqrt{(a'_i - a''_i)^2 + (b'_i - b''_i)^2}} \quad (24)$$

kur  $a'$ ,  $b'$  yra pradinio bandinio, apšviesto D65 spinduoliu, komponentės, o  $a''$ ,  $b''$  yra pasendinto bandinio, apšviesto atstatančiuoju apšvietimu, komponentės,  $n$  - bandinių skaičius.

### 5.3.3. Klaidos įvertinimas atspalvio atžvilgiu

Atspalvio klaidos įvertinimo funkcijoje yra ignoruojama ne tik šviesio komponentė, bet ir sodris. Šiuo atveju yra vertinamas tik atspalvis - kampas aplink (0;0) tašką. Atspalvio pokytis yra mažesnis kampas tarp tiesių, nubrėžtų per (0;0) ir originalios ir atstatytos spalvos  $a^*b^*$  projekcijoje:

$$RMSE^{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\alpha_i - \beta_i)^2}, \quad (25)$$

kur  $\alpha$  ir  $\beta$  yra kampai su koku nors atskaitos tašku, pavyzdžiui, (1;0). Kampai yra apskaičiuojami naudojant  $atan2$  funkciją,  $n$  - bandinių skaičius.  $atan2$  yra speciali funkcija, egzistuojanti daugiausia programavimo kalbose, kuri priima  $x$  ir  $y$  parametrus ir gražina arktangentą su reikiamu poslinkiu tam, kad būtų galima apskaičiuoti koku kampu  $(x, y)$  yra aplink (0;0) tašką.

### 5.3.4. Klaidos įvertinimas sodrio atžvilgiu

Šioje klaidos įvertinimo funkcijoje yra ignoruojamas šviesio ir atspalvio poslinkis ir yra vertinamas tik sodrio pokytis. Ši funkcija yra optimistinė, nes tikisi, kad atspalvis nebuvo



iškraipytas, o pakito tik spalvos sodris, pavyzdžiui, ji išbluko. Klaidos įvertinimo funkcija vertina sodrio skirtumą tarp originalios ir atstatytos spalvos:

$$RMSE^{sat} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\sqrt{a_i'^2 + b_i'^2} - \sqrt{a_i''^2 + b_i''^2})^2} \quad (26)$$

kur  $a'$ ,  $b'$  yra pradinio bandinio, apšviesto D65 spinduoliu, komponentės, o  $a''$ ,  $b''$  yra pasendinto bandinio, apšviesto atstatančiuoju apšvietimu, komponentės,  $n$  - bandinių skaičius.

## 5.4. Atstatymas

### 5.4.1. Atstatymo įvertinimas

Rezultatų palyginimui yra svarbu turėti vieningą vertinimo sistemą. Atstatymo veiksmingumas bus matuojamas RMSE sumažėjimu procentais lyginant su pradine RMSE reikšme. Veiksmingumas bus vertinamas dviem būdais: naudojantis daline ir bendrąja klaidos įvertinimo funkcija. Veiksmingumas pagal dalinę klaidos įvertinimo funkciją parodo RMSE sumažėjimą vertinimui naudojant tokią pačią klaidos įvertinimo funkciją, kokia buvo naudojama minimizavimo uždavinyje. Veiksmingumas pagal bendrąją klaidos įvertinimo funkciją parodo RMSE sumažėjimą vertinimui naudojant  $RMSE^{Lab}$  funkciją. Abejais atvejais atstatymo veiksmingumas negali būti didesnis, nei 100%. Taip pat veiksmingumas skaičiuojant pagal dalinę klaidos įvertinimo funkciją negali būti žemesnis už 0%. Veiksmingumas, skaičiuojamas pagal bendrąją klaidą gali būti mažesnis už 0%, jei vertinant spalvos poslinkį  $L*a*b*$  erdvėje, ji dar labiau nutolo nuo pradinės spalvos.

### 5.4.2. Nelder-Mead algoritmo iteracijų skaičius

Nelder-Mead algoritmo veikimo principas yra veiksmų kartojimas siekiant priartinti simpleksą prie minimumo. Vidutinė vienos algoritmo iteracijos trukmė  $< 0,02ms$  (kompiuteris: Intel Core i7-3630QM, 12GB RAM, SSD, Ubuntu 16.04LTS). Bendru atveju algoritmas veikia tol, kol yra pasiekiamas norimas rezultatas, tai yra, kol simplekso viršūnių išsibarstymo standartinis nuokrypis  $\sigma$  tampa mažesnis už iš anksto užduotą reikšmę  $\epsilon$  arba kai algoritmo iteracijų skaičius pasiekia maksimalią leistiną vertę - saugiklį nuo per ilgai veikiančios programos. Nei viename iš atliktų eksperimentų šis saugiklis (10000 iteracijų) nesuveikė. Vidutinis iteracijų skaičius priklauso nuo atstatomų bandinių skaičiaus ir nuo pasirinktos klaidos įvertinimo funkcijos. Rezultatai yra pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Vidutinis Nelder-Mead iteracijų skaičius priklausomai nuo klaidos įvertinimo funkcijos ir bandinių kiekio derinyje

Klaidos įv. funkcija	RMSE <sup>Lab</sup>	RMSE <sup>ab</sup>	RMSE <sup>αβ</sup>	RMSE <sup>sat</sup>
1 bandinys	274	221	187	173
Deriniai iš 2	651	551	255	240
Deriniai iš 3	629	654	446	479
Deriniai iš 4	614	646	588	649
Deriniai iš 5	600	629	601	686
25 bandiniai	508	614	721	616

Vidutinio iteracijų skaičiaus sumažėjimas, kai uždavinys sudėtingėja, atspindi tai, kad pradinė minimizavimo uždavinio reikšmė - D65 apšvietimas yra pakankamai arti minimumo taško, o tai savo ruožtu reiškia, kad derinio atstatymo veiksmingumas bus žemas, nes derinys yra sunkiai atstatomas.

## 5.5. Vieno spalvinio bandinio atstatymo eksperimentas

Pirmasis atliktas eksperimentas yra kiekvieno bandinio atstatymas individualiai. Šis atstatymo uždavinys yra gan paprastas, nes vienu metu buvo atstatoma tik viena spalva. Vienos spalvos atstatymas neturėjo įtakos ir jam neturėjo įtakos kitų spalvų atstatymas. Bandiniai buvo bandomi atstatyti naudojant visas keturias klaidos įvertinimo funkcijas:  $RMSE^{Lab}$ ,  $RMSE^{ab}$ ,  $RMSE^{\alpha\beta}$  ir  $RMSE^{sat}$ . Atstatymo veiksmingumas pagal dalinę klaidos įvertinimo funkciją yra pateikiamas 2, 3, 5 ir 7 stulpeliuose 3 lentelėje. Atitinkamai, 4, 6 ir 8 stulpelyje yra pateiktas atstatymo veiksmingumas pagal bendrą klaidos įvertinimo funkciją. Kadangi vieno bandinio atveju RMSE gražina tą patį bandinio įvertį, galima teigti, kad  $RMSE^{Lab}$  ir  $RMSE^{ab}$  atveju yra pateikiamas atstumo atitinkamai  $L*a*b^*$  erdvėje ir  $a*b^*$  projekcijoje sumažėjimas.

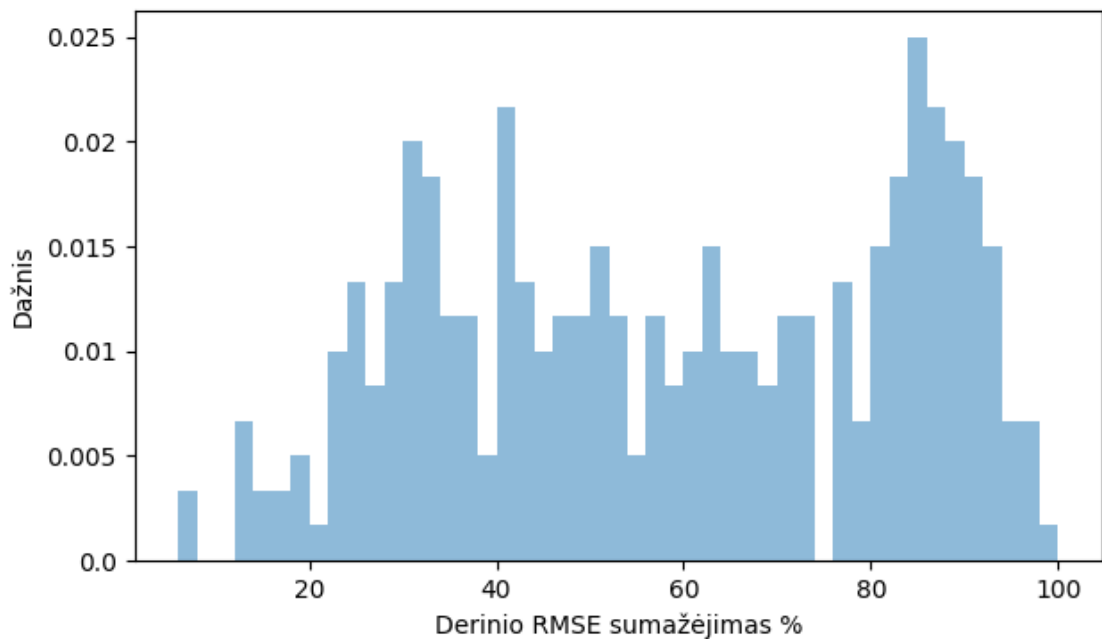
Kaip matyti 3 lentelėje, didžiausią veiksmingumą pagal bendrąją klaidos įvertinimo funkciją parodė pati  $RMSE^{Lab}$ . Toliau atitinkamai išsidėstė  $RMSE^{ab}$ ,  $RMSE^{\alpha\beta}$  ir  $RMSE^{sat}$  funkcijos. Vieno bandinio atstymo atveju nėra prasmės ieškoti kompromisų klaidos įvertinimo funkcijai, nes bendruoju atveju atstatymo efektyvumas buvo labai artimas 100%. Vienintelis išsiskiriantis atvejis yra bandinys B20, kurio atstatymo efektyvumas pagal bendrąją klaidos įvertinimo funkciją nesiekė 75%. Tačiau šį bandinį atstatant su mažiau griežtomis klaidos įvertinimo funkcijomis, veiksmingumas buvo artimas 100%. Tai patvirtina hipotezę, kad mažinant dalinę klaidą didėja bendroji klaida.

3 lentelė. Atstatymo veiksmingumas atstantant kiekvieną bandinį individualiai

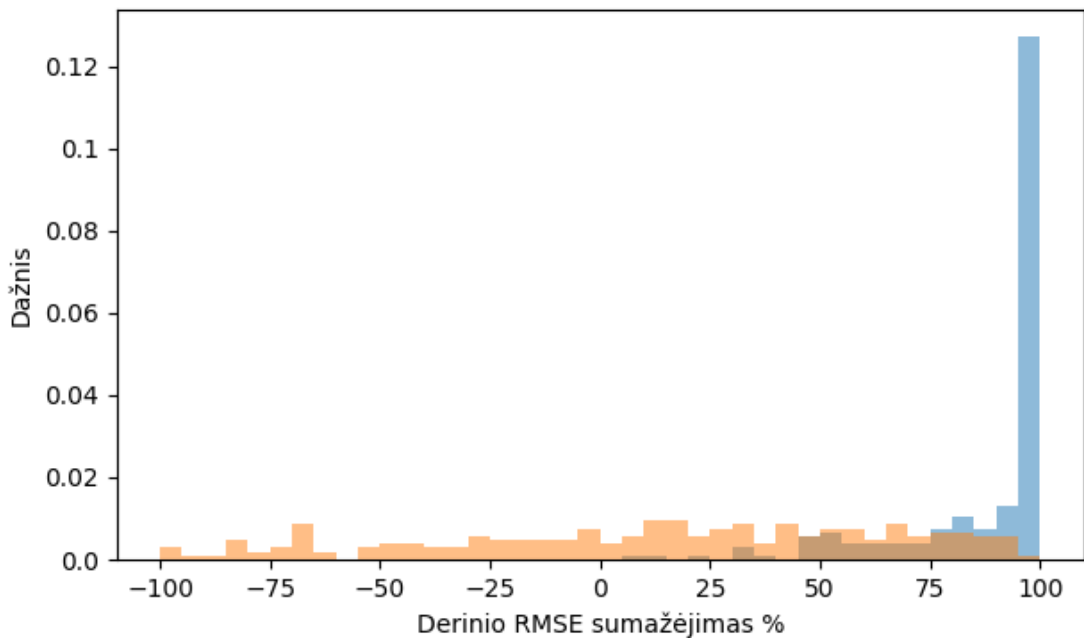
Kl. įv. f-ja	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{ab}$		$RMSE^{\alpha\beta}$		$RMSE^{sat}$	
Veiksmingumas	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{ab}$	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{\alpha\beta}$	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{sat}$	$RMSE^{Lab}$
Bandinys							
B0	100	100	90,646	100	-114,8	100	40,201
B1	100	100	88,273	100	-100,037	100	43,982
B2	99,998	99,998	-207,405	100	-175,283	99,999	-507,812
B3	100	83,24	53,331	100	7,429	100	2,609
B4	99,998	99,999	-144,159	100	-181,758	99,999	-111,315
B5	100	100	84,614	99,999	-73,6	99,999	-32,834
B6	100	100	58,298	100	79,418	100	-86,46
B7	100	100	92,435	100	18,405	100	13,384
B8	99,995	99,997	-611,009	100	-1950,599	99,992	-548,952
B9	99,999	100	-49,274	100	-633,824	100	-101,185
B10	99,999	99,999	-8,105	100	-544,507	99,999	-42,705
B11	99,999	99,999	-17,875	100	-68,922	99,989	-147,056
B12	100	100	82,445	100	49,731	100	54,389
B13	100	100	78,213	100	24,298	99,999	21,494
B14	99,999	99,997	-150,841	99,998	-260,806	99,995	-162,538
B15	100	100	88,91	100	-169,856	100	64,97
B16	100	100	44,539	100	-133,254	100	-3,743
B17	99,999	100	8,018	100	-57,773	99,907	-54,13
B18	100	100	-30,41	99,999	-31,884	100	-30,959
B19	99,999	99,999	-22,399	100	-86,157	99,998	-50,273
B20	74,498	100	27,668	99,999	-84,326	100	28,225
B21	100	100	83,099	100	-79,121	100	53,929
B22	99,999	99,999	42,055	100	-8,598	99,997	-52,259
B23	99,999	99,999	23,891	99,999	-169,048	99,998	-60,755
B24	100	99,999	-27,26	100	15,334	100	-38,89

## 5.6. Dviejų spalvinių bandinių atstatymo eksperimentas

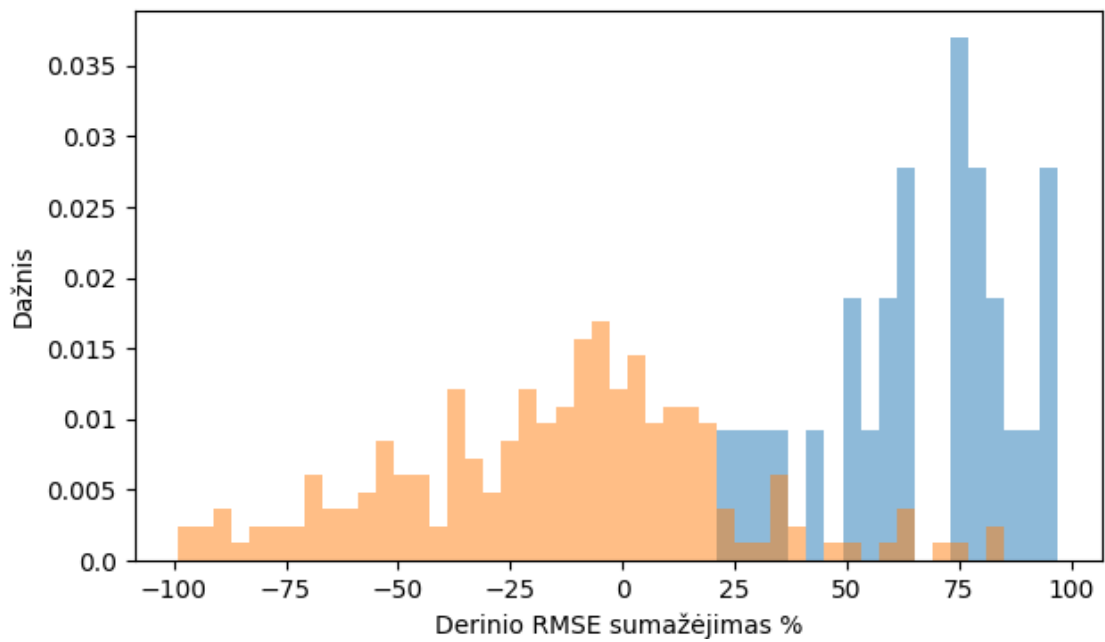
Eksperimentas, kuomet yra bandomos atstatyti dvi spalvos iš karto, naudojant vieną apšvietimą, yra sudėtingesnis, nei atstatant po vieną spalvą. Eksperimento metu buvo bandyta po vieną kartą atstatyti visi įmanomi dviejų spalvų deriniai. Iš viso derinių - 300. Minimizavimo uždavinyje buvo naudojamos visos keturios klaidos įvertinimo funkcijos:  $RMSE^{Lab}$ ,  $RMSE^{ab}$ ,  $RMSE^{\alpha\beta}$  ir  $RMSE^{sat}$ . Atstatymo veiksmingumo pasiskirstymas atitinkamai pateiktas 3, 4, 5 ir 6 paveikslukuose. Mėlyna spalva parodo atstatymo veiksmingumo pasiskirstymą vertinant pagal dalinę klaidos vertinimo funkciją, oranžinė - vertinant pagal bendrąją.



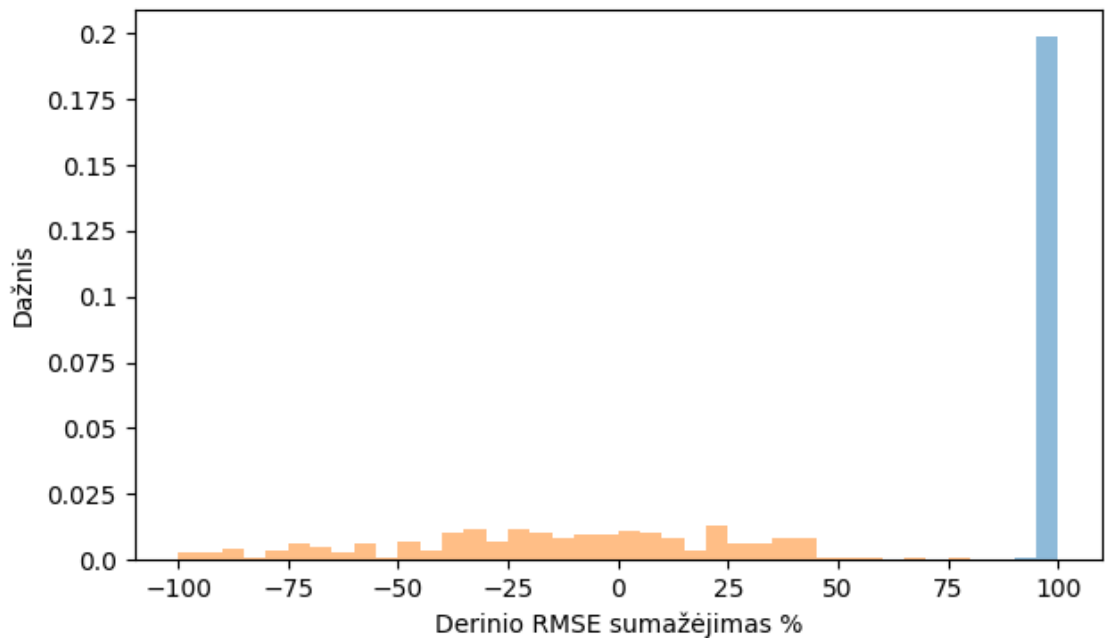
3 pav. Atstatymo veiksmingumo pasiskirstymas atstatant derinius iš dviejų, kai klaidos funkcija yra  $RMSE^{Lab}$



4 pav. Atstatymo veiksmingumo pasiskirstymas atstatant derinius iš dviejų, kai klaidos funkcija yra  $RMSE^{ab}$



5 pav. Atstatymo veiksmingumo pasiskirstymas atstatant derinius iš dviejų, kai klaidos funkcija yra  $RMSE^{\alpha\beta}$



6 pav. Atstatymo veiksmingumo pasiskirstymas atstatant derinius iš dviejų, kai klaidos funkcija yra  $RMSE^{sat}$

Pagal gautus grafikus, didžiausią veiksmingumą pagal bendrąją klaidą turi  $RMSE^{Lab}$  klaidos įvertinimo funkcija, toliau atitinkamai seka  $RMSE^{ab}$ ,  $RMSE^{\alpha\beta}$  ir  $RMSE^{sat}$  funkcijos. Kadangi kai kurie veiksmingumo įvertinimai pagal  $RMSE^{Lab}$  buvo gerokai mažesni už -100%

(tokių atitinkamai buvo 0, 88, 93 ir 63) ir labai iškreipė grafiko režius, jie buvo neįtraukti į grafiką. Palyginus veiksmingumo pasiskirstymo histogramas galima dar kartą patvirtinti hipotezę, kad klaidos įvertinimo funkcijoje atsisakant kai kurių komponenčių ir mažinant dalinę klaidą didėja bendroji klaida.

Įdomiausi iš visų derinių buvo tie, kurių bendras atstatymo veiksmingumas buvo mažiausias. Tuomet galima palyginti kaip veiksmingai jie buvo atstatyti naudojant dalines klaidos įvertinimo funkcijas. 10 mažiausiai veiksmingų derinių rezultatai yra pateikti 4 lentelėje.

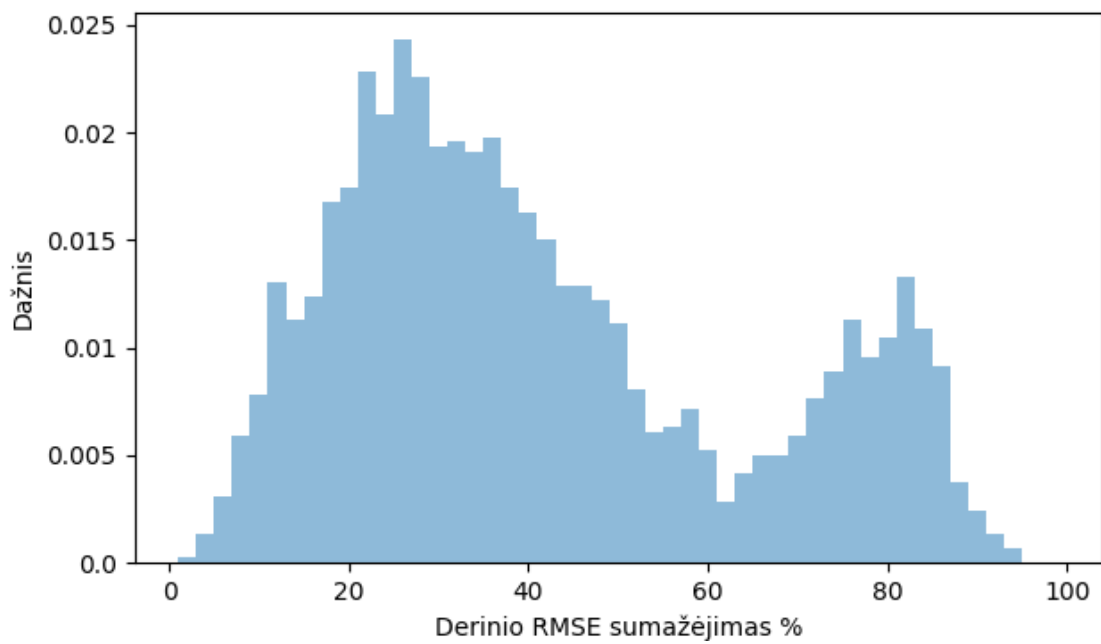
4 lentelė. 10 derinių iš 2, kurių atstatymo veiksmingumas (procentais) pagal bendrąją klaidos įvertinimo funkciją yra mažiausias

Kl. įv. f-ja	RMSE <sup>Lab</sup>		RMSE <sup>ab</sup>		RMSE <sup>αβ</sup>		RMSE <sup>sat</sup>	
	RMSE <sup>Lab</sup>	RMSE <sup>ab</sup>	RMSE <sup>Lab</sup>	RMSE <sup>αβ</sup>	RMSE <sup>Lab</sup>	RMSE <sup>sat</sup>	RMSE <sup>Lab</sup>	
Derinys								
12 ir 24	7,029	100	-518,986	99,998	-6,765	100	-1,798	
6 ir 24	7,526	99,999	-485,507	99,999	-11,701	99,999	-48,463	
8 ir 24	12,877	99,999	-538,359	99,999	-63,345	99,999	-104,779	
6 ir 18	12,992	99,049	-192,003	99,999	-2,355	100	-21,789	
12 ir 18	13,061	97,313	-216,182	100	-8,342	100	-5,735	
9 ir 24	13,31	76,653	-178,833	64,302	-4,029	99,999	-12,322	
9 ir 18	15,064	93,568	11,776	100	-22,602	99,999	-105,161	
8 ir 18	15,297	98,288	-15,76	100	-38,974	100	-62,079	
10 ir 24	16,689	65,162	-146,268	58,339	2,575	99,999	-6,135	
10 ir 18	17,63	97,003	-1,773	100	-46,404	100	-126,317	

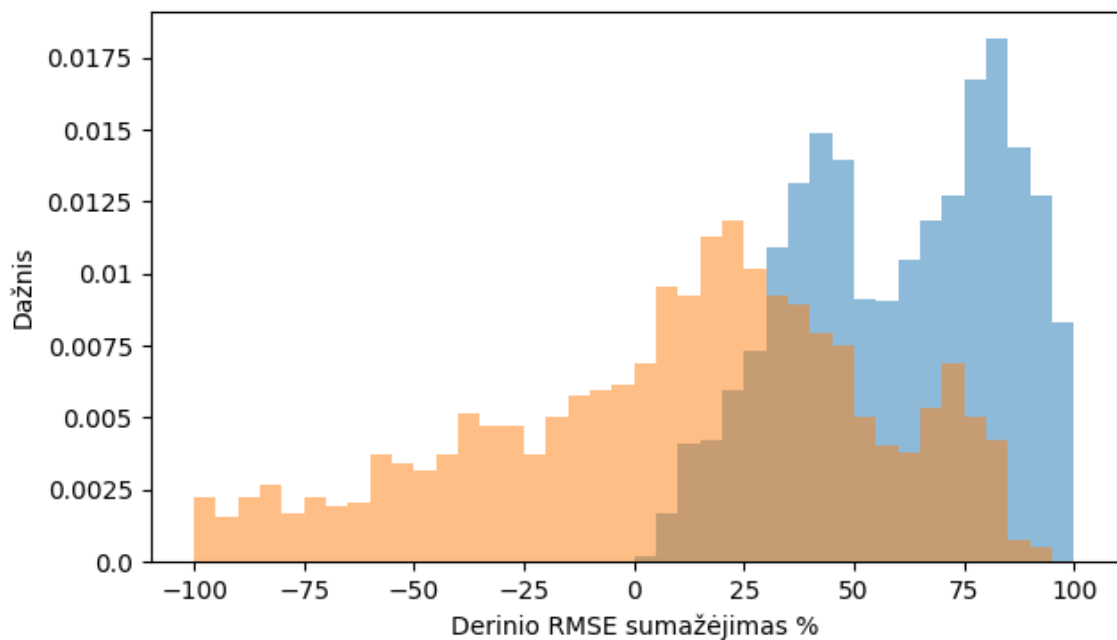
Atstatant šiuos derinius su  $RMSE^{ab}$ ,  $RMSE^{\alpha\beta}$  ir  $RMSE^{sat}$  klaidos įvertinimo funkcijomis, veiksmingumas ženkliai padidėjo, tačiau beveik visais atvejais veiksmingumas pagal bendrą klaidos įvertinimo funkciją tapo neigiamas. Tai reiškia, kad šiuos bandinius geriau būtų apšviesti D65 spinduoliu. Verta pastebėti, kad visuose deriniuose yra arba B18 arba B24 bandinys.

## 5.7. Trijų spalvinių bandinių atstatymo eksperimentas

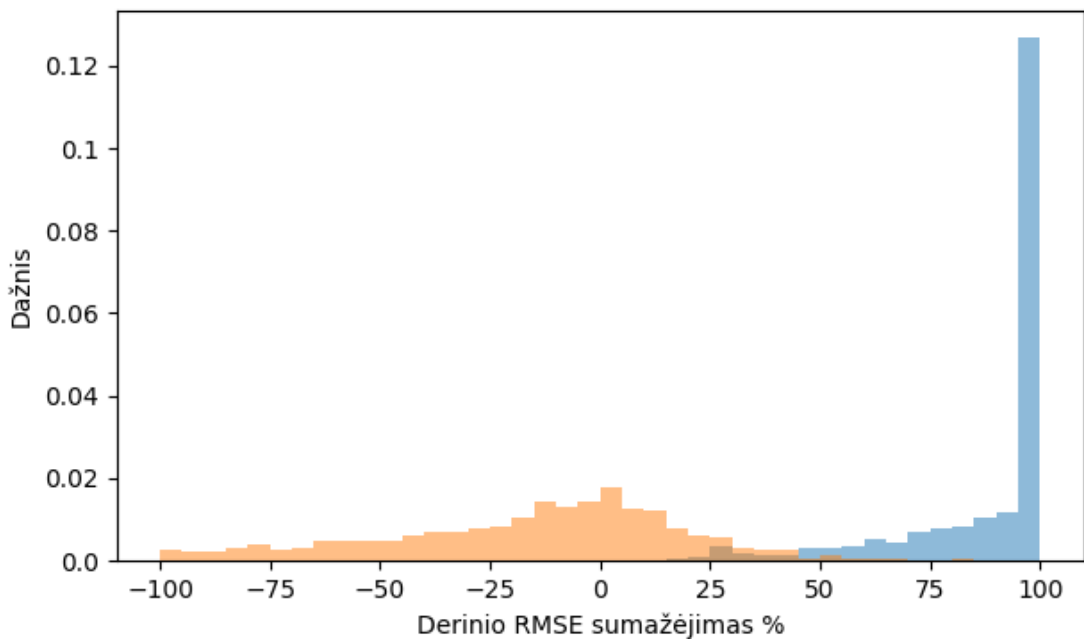
Toliau buvo atliktas eksperimentas, kuomet naudojant tą patį apšvietimą yra bandoma atstatyti trys spalviniai bandiniai. Didėjant vienu metu atstatomų spalvų skaičiui, dar labiau sudėtingėja uždavinys. Eksperimento metu buvo bandyta po vieną kartą atstatyti visi įmanomi trijų spalvų deriniai. Iš viso derinių - 2300. Kaip ir prieš tai atliktuose eksperimentuose, buvo naudojamos šios klaidos įvertinimo funkcijos:  $RMSE^{Lab}$ ,  $RMSE^{ab}$ ,  $RMSE^{\alpha\beta}$  ir  $RMSE^{sat}$ . Kaip ir dviejų spalvinių bandinių atstatymo eksperimente, atitinkami rezultatai yra pateikti 7, 8, 9 ir 10 paveikslėliuose. Mėlynos histogramos parodo atstatymo veiksmingumo pasiskirstymą vertinant pagal dalinę klaidos vertinimo funkciją, oranžinės - vertinant pagal bendrąją.



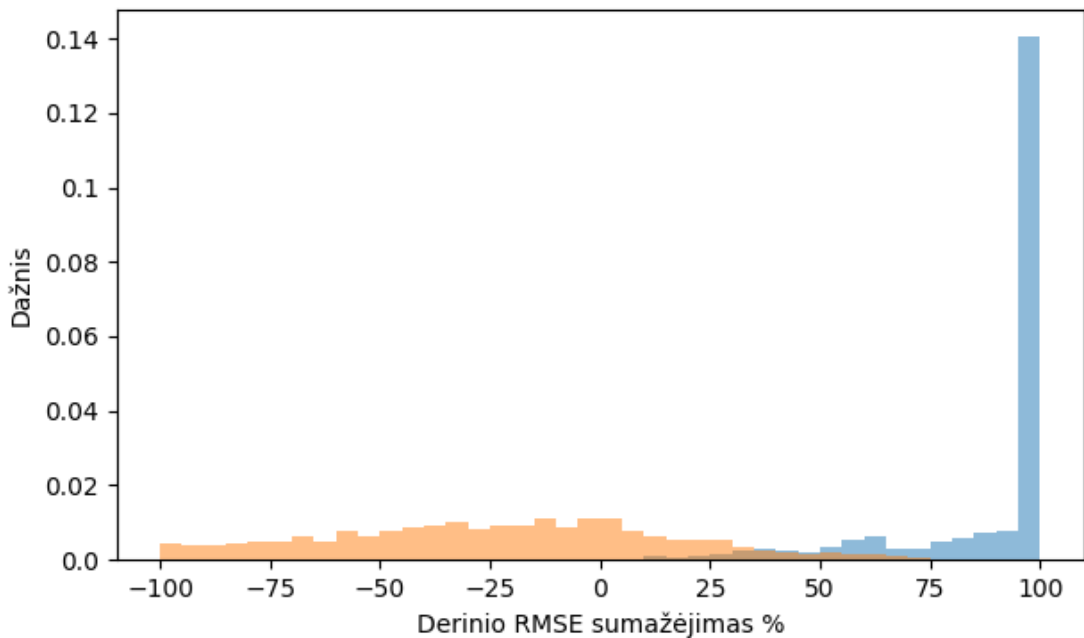
7 pav. Atstatymo veiksmingumo pasiskirstymas atstatant derinius iš trijų, kai klaidos funkcija yra  $RMSE^{Lab}$



8 pav. Atstatymo veiksmingumo pasiskirstymas atstatant derinius iš trijų, kai klaidos funkcija yra  $RMSE^{ab}$



9 pav. Atstatymo veiksmingumo pasiskirstymas atstatant derinius iš trijų, kai klaidos funkcija yra  $RMSE^{\alpha\beta}$



10 pav. Atstatymo veiksmingumo pasiskirstymas atstatant derinius iš trijų, kai klaidos funkcija yra  $RMSE^{sat}$

Kaip ir dviejų spalvų atstatymo eksperimente, rezultatai, kuomet  $RMSE^{Lab}$  buvo mažiau už -100% (atitinkamai tokių buvo 0, 354, 617 ir 652), buvo ignoruojami siekiant neiškraipyti grafiko. Taip pat, kaip ir dviejų spalvų atstatymo ekperimente, funkcijos naudojamų parametru



mažinimas mažina dalinę klaidą, tačiau didina bendrąją klaidą. 7 grafike galima matyti išsiskiriančius du varpo formos plotus - vieną ties 25%, kitą ties 80%.

Eksperimento atžvilgiu įdomiausi deriniai yra pateikti 5 lentelėje. Kaip ir prieš tai aprašytame eksperimente, lentelėje yra pateikti 10 derinių, kurių atstatymo veiksmingumas pagal bendrąją klaidos įvertinimo funkciją buvo žemiausias.

5 lentelė. 10 derinių iš 3, kurių atstatymo veiksmingumas pagal bendrąją klaidos įvertinimo funkciją yra mažiausias

Kl. įv. f-ja	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{ab}$		$RMSE^{\alpha\beta}$		$RMSE^{sat}$	
Veiksmingumas	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{ab}$	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{\alpha\beta}$	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{sat}$	$RMSE^{Lab}$
Derinys							
6, 13 ir 24	2,172	91,614	-297,066	83,882	-19,198	99,999	-273,979
6, 13 ir 18	3,323	96,633	-276,577	99,999	-10,553	100	-66,337
12, 13 ir 18	4,105	99,615	-227,288	100	-11,538	100	-59,938
6, 9 ir 24	4,502	53,391	-484,251	62,318	4,646	68,352	-477,164
8, 12 ir 24	4,722	81,569	-527,715	99,999	-52,701	100	-620,313
12, 13 ir 24	4,745	91,597	-246,178	74,6	-57,404	100	-46,547
6, 8 ir 24	4,938	77,075	-653,614	75,321	-29,246	86,286	-889,832
5, 9 ir 24	5,54	85,558	-127,8	60,325	-10,091	99,998	-38,028
5, 11 ir 24	5,659	70,92	-104,63	100	-46,205	99,999	-20,582
9, 12 ir 24	5,697	62,417	-443,046	50,093	1,091	100	-156,492

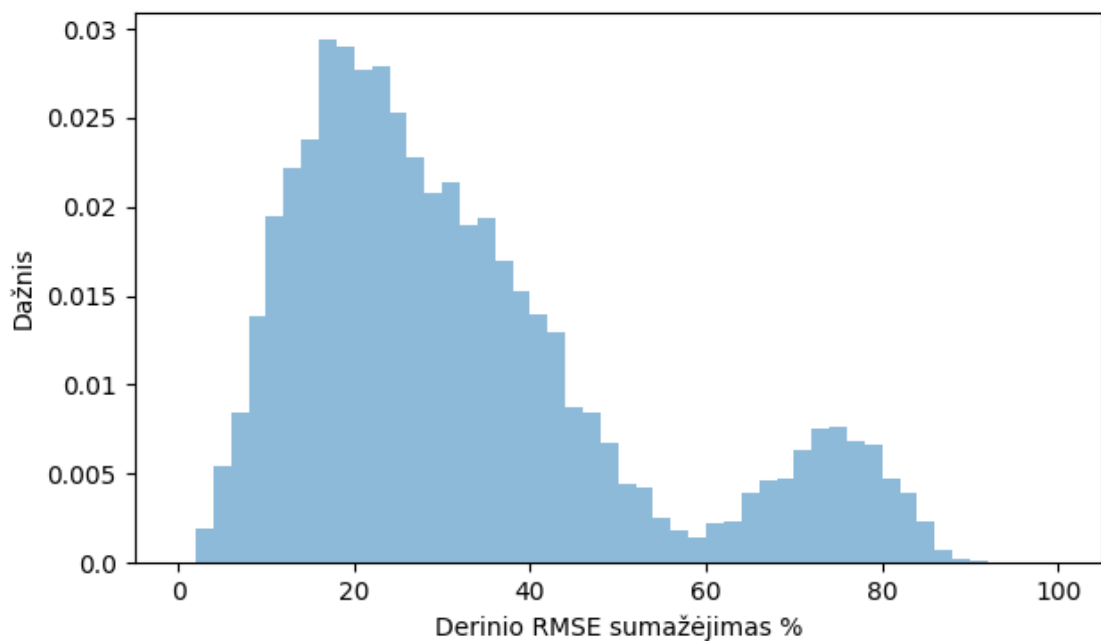
Kaip ir prieš tai, naudojant kitas, nei  $RMSE^{Lab}$  klaidos įvertinimo funkcijas, veiksmingumas ženkliai išaugo, tačiau sumažėjo bendrasis veiksmingumas. Daugeliu atvejų jis tapo neigiamas. Taip pat, kaip ir dviejų spalvinių bandinių atstatymo eksperimente, visuose deriniuose yra B18 arba B24 bandinys.

## 5.8. Keturių spalvinių bandinių atstatymo eksperimentas

Kadangi dviejų ir trijų spalvų atstatymo eksperimentuose didžiausią veiksmingumą turėjo  $RMSE^{Lab}$  klaidos įvertinimo funkcija, keturių spalvų eksperimentas buvo atliktas naudojant tik šią funkciją. Iš viso derinių - 12650. Rezultatai pateikti 11 grafike.

Grafikas primena trijų spalvų atstatymo rezultatus. Aiškiai išsiskiria du varpo formos plotai, tačiau jie yra dar labiau pasislinkę į kairę, nei prieš tai atliktame eksperimente. Tai parodo, kad atstatymo tendencija liko tokia pati, tačiau bendras atstatymo veiksmingumas sumažėjo.

Mažiausią atstatymo veiksmingumą pagal bendrąją klaidos įvertinimo funkciją turintys deriniai yra pateikti 6 lentelėje.



11 pav. Atstatymo veiksmingumo pasiskirstymas atstatant derinius iš keturių, kai klaidos funkcija yra  $RMSE^{Lab}$

6 lentelė. 10 derinių iš 4, kurių atstatymo veiksmingumas pagal bendrąją klaidos įvertinimo funkciją yra mažiausias

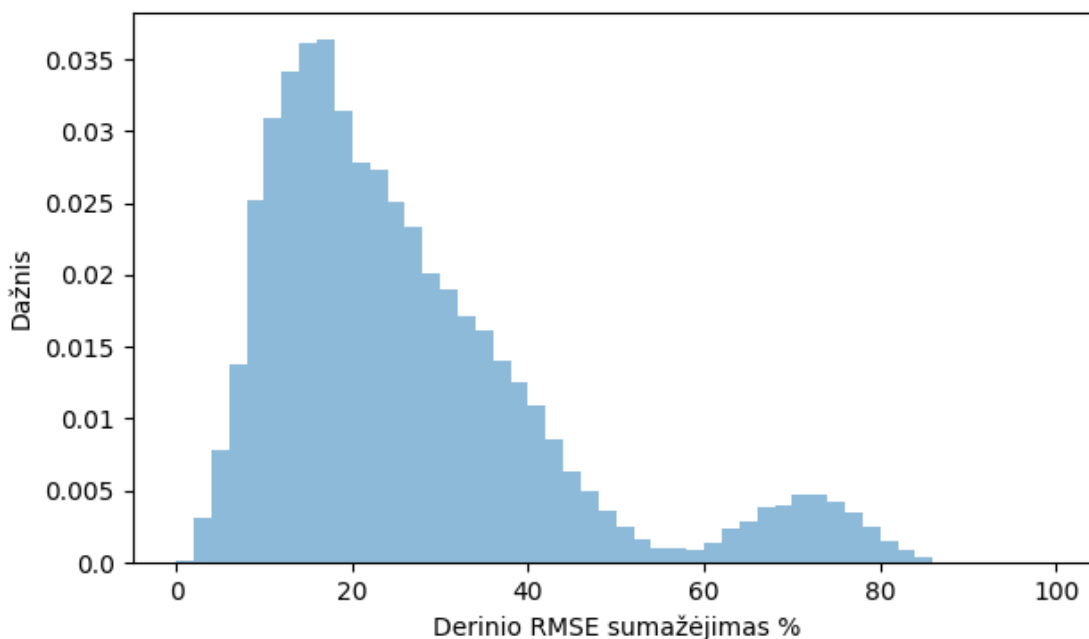
Kl. įv. f-ja	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{ab}$		$RMSE^{\alpha\beta}$		$RMSE^{sat}$	
	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{ab}$	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{\alpha\beta}$	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{sat}$	$RMSE^{Lab}$
Derinys							
6, 8, 13 ir 24	1,777	82,247	-403,471	61,962	-5,96	78,88	-403,243
6, 13, 14 ir 24	2,086	9,474	-16,959	83,238	-11992,141	100	-90,329
2, 6, 13 ir 24	2,162	50,907	-228,748	66,066	-10683,203	100	-237,38
4, 6, 13 ir 24	2,194	22,39	-67,584	72,073	-17,729	100	-118,567
5, 6, 13 ir 24	2,282	49,531	-116,625	71,925	-31,394	53,216	-37,135
6, 13, 15 ir 18	2,311	23,567	-171,077	76,135	-3118,644	52,11	-88,796
5, 12, 13 ir 24	2,417	55,697	-105,137	84,637	-321,661	87,688	-26,476
8, 12, 13 ir 24	2,524	77,926	-361,656	94,847	-121,766	86,411	-325,387
6, 9, 13 ir 18	2,682	67,159	-351,111	73,632	-9,339	73,404	-262,092
5, 10, 13 ir 18	2,717	40,751	-137,887	75,121	-33,716	99,999	-29,09

Visais atvejais bandinių, kuriuos atstatant buvo naudojamos dalinės klaidos įvertinimo funkcijos, atstatymo veiksmingumas pagal bendrąją klaidos įvertinimo funkciją tapo neigiamas.

## 5.9. Penkių spalvinių bandinių atstatymo eksperimentas

Penkių spalvų atstatymo eksperimentas, taip pat kaip ir keturių, buvo atliktas tik su  $RMSE^{Lab}$  klaidos įvertinimo funkcija. Iš viso derinių - 53130. Rezultatus galima matyti 12

grafike.



12 pav. Atstatymo veiksmingumo pasiskirstymas atstatant derinius iš penkių, kai klaidos funkcija yra  $RMSE^{Lab}$

Išvada yra analogiška keturių spalvų atstatymo eksperimento išvadai. Dešinysis varpo formos plotas dar labiau sumažėjo, o kairysis pasislinko į kairę.

Mažiausią atstatymo veiksmingumą pagal bendrąją klaidos įvertinimo funkciją turintys deriniai yra pateikti 7 lentelėje.

7 lentelė. 10 derinių iš 5, kurių atstatymo veiksmingumas pagal bendrąją klaidos įvertinimo funkciją yra mažiausias

Kl. įv. f-ja	$RMSE^{Lab}$		$RMSE^{ab}$		$RMSE^{\alpha\beta}$		$RMSE^{sat}$	
	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{ab}$	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{\alpha\beta}$	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{sat}$	$RMSE^{Lab}$	
Derinys								
8, 12, 13, 14, 24	1,375	7,887	-21,711	93,209	-156,433	57,547	-84,827	
2, 5, 11, 13, 24	1,48	70,618	-120,758	92,427	-392,433	88,173	-76,956	
5, 10, 13, 18, 19	1,574	29,272	-85,953	91,852	-36,225	59,587	-25,9	
5, 8, 12, 13, 24	1,602	46,228	-141,321	97,463	-262,911	48,583	-121,227	
5, 12, 13, 18, 20	1,691	19,978	-61,78	67,253	-4,284	31,861	-74,588	
2, 5, 13, 16, 18	1,715	28,908	-85,701	89,584	-51,742	67,533	-104,732	
2, 6, 8, 13, 24	1,77	51,203	-307,013	65,538	-26,618	59,328	-294,605	
5, 10, 11, 13, 18	1,801	40,633	-128,139	73,98	-16,577	73,805	-93,991	
5, 9, 13, 14, 18	1,834	25,81	-25,797	74,587	-27,69	94,672	-39,645	
2, 6, 13, 14, 24	1,837	9,807	-21,911	75,76	-27444,291	73,481	-59,149	

Išvados yra analogiškos 6 lentelės išvadoms.

## 5.10. Visų spalvinių bandinių atstatymo eksperimentas

Galiausiai buvo bandyta atstatyti visus 25 bandinius vienu metu. Tai yra pats sudėtingiausias eksperimentas, kuris yra įmanomas šiame darbe. Rezultatai pateikiami 8 lentelėje.

8 lentelė. Atstatymo veiksmingumas atstantant visus bandinius iš karto

Kl. įv. f-ja	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{ab}$		$RMSE^{\alpha\beta}$		$RMSE^{sat}$	
Veiksmingumas	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{ab}$	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{\alpha\beta}$	$RMSE^{Lab}$	$RMSE^{sat}$	$RMSE^{Lab}$
Visi bandiniai	7,8177	11,2927	-1,9759	28,165	-42,313	21,238	-5,494

Spalviniai bandiniai praktiškai nebuvo atstatyti, nes nei vienas iš vertinimų neperžengė 30%. Tačiau visais atvejais vertinimas per daug nenutolo nuo 0 (lyginant su 3, 4 ir 5 bandinių atstatymo eksperimentais). Kaip ir prieš tai atliktuose eksperimentuose, galioja išvada, kad kuo mažiau atributų yra įtraukiama į klaidos įvertinimo funkciją, tuo aukštesnis yra dalinės klaidos funkcijos veiksmingumas, tačiau mažesnis bendras veiksmingumas.

## Išvados

Progresas kietakūnių apšvietimo šaltinių kūrimo srityje bei pastebėti spalviniai efektai, kai ta pati scena apšviečiama įvairios spektrinės sudėties šviesa, įgalino iškelti spalvų „restauracijos“ apšvietimu idėją.

Su darbo tema susijusios literatūros analizė atskleidė, kad spalvinio atstatymo tikslą galima pasiekti naudojant skaitmeninį projektorius, kuris įgalina spalvų restauravimo uždavinį kiekvienam vaizdo taškui spręsti nepriklausomai (tačiau šis metodas mažai kuo skiriasi nuo vaizdo demonstravimo baltame ekrane). Šaltiniuose aprašyti spalvinės restauracijos vienalyčiu apšvietimu eksperimentai daugeliu atveju sprendė vienetinę (konkrečią) problemą, pvz., fono spalvos atstatymą, parenkant filtrus ar apšvietimą rankiniu būdu. Magistro darbe sprendžiamas uždavinys - dirbtinai pasendintos turtingos spalvų paletės paviršiaus spalvų automatinis atstatymas, kai naudojamas daugiakanalis apšvietimo įrenginys, kuriame kiekvienos pirminės spalvos intensyvumas yra nustatomas nepriklausomai, yra naujas, ir iki šiol (pilna apimtimi) nenagrinėtas. Atlikus kai kuriuos supaprastinimus problema buvo aprašyta matematiškai kaip optimizacijos uždavinys, kuriam spręsti buvo pasirinktas Nelder-Mead algoritmas dėl savo paprastumo ir nereiklumo analitinėms išraiškoms.

Darbo metu buvo sukurtas apšvietimo simulatorius, skirtas spręsti minimizavimo uždavinį, kuriame reikia rasti atskirų apšvietimo spalvinių kanalų intensyvumus, minimizuojančius bendrąją spalvinių bandinių atstatymo klaidą. Minimizavimo uždavinyje buvo taikomos keturios bandinių spalvinių skirtumą vertinančios klaidos funkcijos, apibrėžtos CIE  $L^*a^*b^*$  spalvinėje erdvėje. Virtualaus atstatymo eksperimentai buvo atlikti deriniams iš vieno, dviejų, trijų, keturių, penkių ir visų spalvinių bandinių. Individualių bandinių atstatymo veiksmingumas siekė 100%, derinių iš dviejų atstatymo veiksmingumas svyravo tarp 40% ir 90%, trijų - tarp 0% ir 60%. Didinant bandinių derinyje skaičių veiksmingumas mažėjo. Eksperimentuose naudojant mažiau griežtas klaidos įvertinimo funkcijas, dalinis veiksmingumas ženkliai padidėjo, dažniausiai iki daugiau, nei 90%. Atlikus simuliacinius eksperimentus buvo padaryta išvada, kad apšvietimu pilnai (dideliu tikslumu) galima atstatyti tik kelias spalvas. Daugelio paletės spalvų pilnas atstatymas yra praktiškai neįgyvendinamas: vienos spalvos atstatymas gali iškraipyti kitas atstatomas spalvas. Rezultatą galima bandyti aiškinti nepakankamu apšvietimo valdomų kanalų skaičiumi (didelis apšvietimo elementų skaičius yra sunkiai technologiškai įgyvendinamas uždavinyje) bei sąlygiškai nemažu atskirų šviestukų banginiu plokšči.

Nepaisant to, kad pradinė hipotezė dėl pasiūlyto paviršiaus spalvų atstatymo metodo nepasitvirtino, aprašyta idėja gali būti naudojama specializuotais atvejais, pvz., kada spalvinės

paletės pigmentų kiekis yra minimalus.

Tolimesni tyrimai galėtų būti atliekami ne tik fiksuotam kiekiui spalvinių bandinių, bet ir jų mišiniams. Taip pat įmanoma, kad pažangesni optimizavimo algoritmai įgalintų efektyvesnę ir tikslesnę globalaus minimumo paiešką. Atstatymo algoritmą galima būtų bandyti patobulinti taip, kad, priklausomai nuo derinyje esančių gretimų spalvinių bandinių, parinktų tinkamiausią žmogaus spalvų suvokimo požiūriu klaidos įvertinimo funkciją.

## Literatūra

- [Ama13] Toshiyuki Amano. Projection Based Real-Time Material Appearance Manipulation. *Proceedings of 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2013, p.p. 918–923.
- [BFH13] Wolfgang Baatz, Massimo Fornasier ir Jan Haskovec. *Scientific Computing and Cultural Heritage: Contributions in Computational Humanities*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Germany, 2013, p.p. 3–10.
- [CŽ13] E. K. P. Chong ir S. H. Žak. *An Introduction To Optimization*. John Wiley & Sons Inc., Canada, 2013. 274-278.
- [FR98] Adrian Ford ir Alan Roberts. *Colour space conversions*. London, England, 1998. 27-32.
- [GPN<sup>+</sup>04] M.D. Grossberg, H. Peri, S.K. Nayar ir P.N. Belhumeur. Making one object look like another: Controlling appearance using a projector-camera system. *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference “Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)”*, 2004, p.p. 452–459.
- [Hel08] Gilbert Held. *Introduction to light emitting diode technology and applications*. Auerbach Publications, Boca Raton, Florida, 2008. 27-32.
- [YHS13] Takenobu Yoshida, Chinatsu Horii ir Kosuke Sato. A Virtual Color Reconstruction System for Real Heritage with Light Projection. *Proceedings of Virtual Systems and Multimedia*, 2013, p.p. 158–164.
- [Laf86] R. H. Lafontaine. Seeing through a yellow varnish: a compensating illumination system. *Studies in Conservation*, 31:97–102, 1986.
- [PP00] Michail Pappas ir Ioannis Pitas. Digital Color Restoration of Old Paintings. *IEEE Transactions on image processing*, 9(2):291–294, 2000.
- [PVF<sup>+</sup>16] Santiago Mayorga Pinilla, Daniel Vázquez, Antonio Álvarez Fernández-Balbuena, Carmen Muro ir Javier Muñoz. Spectral damage model for lighted museum paintings: Oil, acrylic and gouache. *Journal of cultural heritage*, 22:931–939, 2016.
- [SKR<sup>+</sup>16] Jens Stenger, Narayan Khandekar, Ramesh Raskar, Santiago Cuellar, Ankit Mohan ir Rudolf Gschwind. Conservation of a room: A treatment proposal for Mark Rothko’s Harvard Murals. *Studies in Conservation*, 61(6):348–361, 2016.

- [TT03] Marko Tkalčič ir Jurij F. Tasič. Colour spaces: perceptual, historical and applicational background. *Proceedings of EUROCON 2003. Computer as a Tool. The IEEE Region 8*, 2003, p.p. 304–308.
- [TŽ89] Aimo Törn ir Antanas Žilinskas. *Global Optimization*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Germany, 1989, p.p. 1–24.
- [VCL11] Françoise Viénot, Guillaume Coron ir Bertrand Lavédrine. LEDs as a tool to enhance faded colours of museums artefacts. *Journal of Cultural Heritage*, 12(4):431–440, 2011.
- [Wiki00] Vikipedija. CIE 1931 color space. [https://en.wikipedia.org/wiki/CIE\\_1931\\_color\\_space](https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space). Žiūrėta 2016-12-13.
- [Wiki01] Vikipedija. Lab color space. [https://en.wikipedia.org/wiki/Lab\\_color\\_space](https://en.wikipedia.org/wiki/Lab_color_space). Žiūrėta 2016-12-14.
- [WS00] G. Wyszecki ir W.S. Stiles. *Color Science*. John Wiley & Sons Inc., Canada, 2000. 166-168.
- [WS03] Karol Wnukowicz ir Władysław Skarbek. Colour temperature estimation algorithm for digital images-properties and convergence. *Opto - Electronics Review*, 11(3):193–196, 2003.
- [ŽVV+12] A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, A. Tuzikas, A. Petrulis ir M. Shur. Color rendition engine. *Opt. Express*, 20(5):5356–5367, 2012.
- [ŽVV+13] A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta, A. Tuzikas ir M. Shur. Polychromatic solid-state light sources for the control of colour saturation of illuminated surfaces. Vilnius University patent publication WO/2013/009157. 2013.