

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE
OPTOMETRIJAS UN REDZES ZINĀTNES NODAĻA

KRĀSU KALIBRĒŠANAS ALGORITMU IZSTRĀDE

BAKALaura DARBS

Autors: Anastasija Kalačikova

Studenta apliecības numurs: ak16035

Vadītājs: lektors, prof.mag. Renārs Trukša

RĪGA 2022

ANOTĀCIJA

Darbs ir uzrakstīts latviešu valodā uz 24 lapaspusēm. Tas satur 16 attēlus, 4 pielikumus un 19 atsauces uz literatūras avotiem.

Darba mērķis: Pārbaudīt un modificēt datoru monitoru krāsu kalibrēšanas algoritmu.

Metode: Pētījumā tika izmantots NEC monitors, kuram tika noskaidroti esoša krāsu kalibrēšanas algoritma koeficienti un tika ierosināta šī algoritma modificēšana, t.sk. precīzi noskaidrotas lineārās sakarības starp katra krāsu kanāla X un Z integrālsummām un spožuma vērtībām.

Rezultāti: Neviens no algoritmiem (standarta un modificēts) nenodrošina ideālu rezultātu, kā arī neviens no algoritmiem neuzrāda ka viens būtu labāks par otru.

Atslēgvārdi: Algoritms, krāsu sajaukšanas sistēma, monitors, spožums, integrālsummas.

ABSTRACT

The thesis is written in Latvian on 24 pages. It contains 16 figures, 4 appendices, and 19 references.

The aim of the work: To test and modify the color calibration algorithm of computer monitors. Method: using NEC monitor, the coefficient of the color calibration algorithm was determined and a modification of algorithm proposed, including exact linear relations between X and Z integrals and luminance values of each color channels.

Results: None of the algorithms (standard and modified) provides ideal results, as well as none of the algorithm provides better results than another.

Keywords: Algorithm, color matching function, monitor, brightness, integers.

SATURS

IEVADS	1
1. LITERATŪRAS PĀRSKATS	3
1.1 Terminoloģija	3
1.2. Displeju veidi	3
1.3. Krāsu sajaušanas sistēmas RGB un CMYK	5
1.4. Krāsu sajaušanas sistēmas HSB un Lab	6
2. METODE	9
2.1 Pētījuma apraksts	9
2.2 KALIBRĒŠANAS METODIKA	10
3. REZULTĀTI	20
4. DISKUSIJA	25
SECINĀJUMI	26
PATEICĪBA	27
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	28
1. PIELIKUMS	31
2. PIELIKUMS	33
3. PIELIKUMS	35
4. PIELIKUMS	37

IEVADS

Katrs monitors atveido krāsas atšķirīgi, dažreiz ar ļoti būtiskām atšķirībām, kas var radīt problēmas ar krāsas uztveri. Monitoru kalibrēšanas galvenais mērķis ir pareizi attēlot krāsas monitorā, lai citi lietotāji redzētu tieši to, ko autors vēlējas parādīt.

Kalibrēšana tiek veikta dažādām ierīcēm, t.sk. ikdienā lietojamiem monitoriem, gan ārpus ēkām izvietotajiem LED ekrāniem, lai to redzamība nakts stundās netraucētu ceļu satiksmes dalībniekiem, kā to apraksta (*He et. al., 2020*), gan plašāk izplatītajiem LCD monitoriem, ko pētījumā apraksta (*Zhang et. Al. 2018*), kā arī medicīnā izmantojamiem monitoriem, kur ir svarīga korekta krāsu atainošana monitora ekrānā, korektai datu interpretācijai, ko pētījumā apraksta (*Fan et al., 2009*).

Shepherd jau 1997. gada publikācijā izcēla vairākas problēmas, kas saistītas ar monitoriem optikas pētījumu vajadzībām. Monitoru kalibrēšanu un krāsu mērījumu nepieciešamību, krāsu sajaukšanos viena monitora ietvaros, kad vairāku krāsu rādītāji var novirzīties no aprēķinātajiem vai prognozējamiem parametriem. Viņš veica pārbaudi kolorimetram Minolta CS-100 un veica mērījumu kopu diviem Sony Trinitron ekrāniem, rezultātā piedāvājot kalibrēšanas tehniku optikas eksperimentu veikšanai.

Optometrijas un redzes zinātnes eksperimentos ir svarīga korekta krāsu atainošana (*To et al., 2013*). Krāsu monitora kalibrēšana bija aktuāla gan 1990.gadā (*Lucassen et al., 1990*), gan arī mūsdienās (*Duan et al., 2021*). Pēdējais pētījums apraksta problēmas ar rentgenogrāfijas ierīci. Iegūtie rezultāti var būt kļūdaini fantomu iemeslu dēļ, piemēram, noteiktā rentgena attēla daļa var būt neskaidrāka vai arī var parādīties neesoša detaļa, kas traucē korektai rezultātu analīzei.

Bakalaura darba **mērķis** ir pārbaudīt un modificēt datoru monitoru krāsu kalibrēšanas algoritmu.

Lai sasniegtu izvirzīto mērķi, tika noteikti sekojoši darba **uzdevumi**:

1. Noskaidrot kalibrēšanas koeficientus standarta krāsu kalibrēšanas algoritmam.
2. Noskaidrot kalibrēšanas koeficientus jaunizveidotajam krāsu kalibrēšanas algoritmam.
3. Veikt atkārtotus spektrālos mērījumus stimuliem, kas netika izmantoti, lai noskaidrotu krāsu kalibrēšanas algoritmu koeficientus.
4. Izvērtēt standarta un jaunizveidotā krāsu kalibrēšanas algoritma precizitāti.

5. Salīdzināt standarta un jaunizveidoto krāsu kalibrēšanas algoritmu.

Bakalaura darba **hipotēze**: izstrādātais algoritms nodrošinās monitora ekrānā attēloto krāsu atbilstību vēlamajiem parametriem.

Algoritma izstrāde ļaus veikt monitora kalibrēšanu korektai krāsu atainošanai monitorā. Darbā tiks veikts kvantitatīvs pētījums.

1. LITERATŪRAS PĀRSKATS

1.1. Terminoloģija

Gaisma ir tas starojuma enerģijas aspekts, ko cilvēks vērotājs apzinās vizuālās sajūtas, kas rodas, stimulējot acs tīkleni ar starojuma enerģiju. Krāsa ir vizuālās uztveres aspekts, ar kuru novērotājs var atšķirt atšķirības starp diviem tāda paša izmēra un formas skata laukiem bez struktūras, ko var izraisīt novērojumā attiecīgās starojuma enerģijas spektrālās sadalīšanās atšķirības (*Суровцев и др., 2020*).

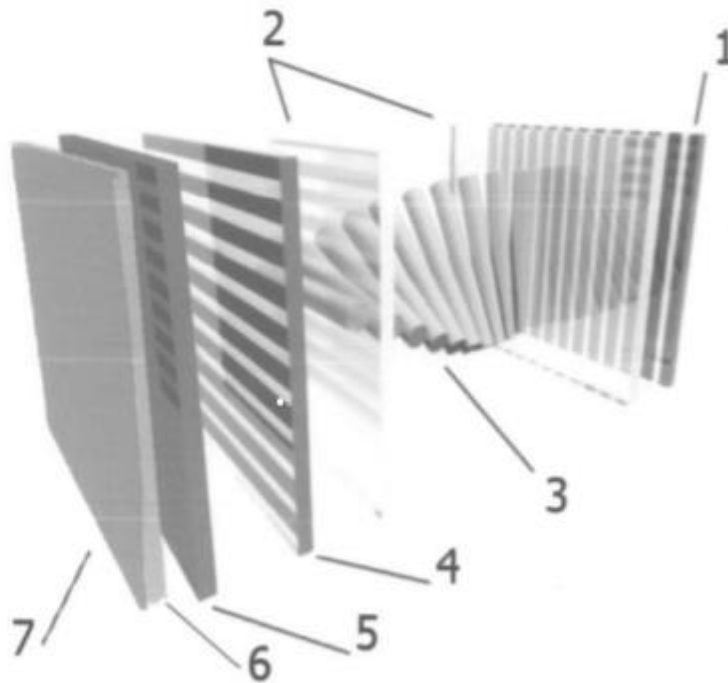
Spilgtums ir vizuālās sajūtas atribūts, saskaņā ar kuru dotais vizuālais stimulš šķiet vairāk vai mazāk intensīvs, vai saskaņā ar kuru apgabals, kurā tiek parādīts vizuālais stimulš, izstaro vairāk vai mazāk gaismas. Spilgtums svārstās no "blāvs" līdz "spilgts". Savukārt, gaišums svārstās no "tumša" līdz "gaismai". Vieglums ir vizuālās sajūtas atribūts, saskaņā ar kuru apgabals, kurā tiek parādīts vizuālais stimulš, šķiet, izstaro vairāk vai mazāk gaismas proporcionāli tai, ko izstaro līdzīgi apgaismots laukums, kas tiek uztverts kā "balts". stimulš. To dažreiz sauc par relatīvo spilgtumu. Hromatiskums ir vizuālās sajūtas atribūts, saskaņā ar kuru apgabala (uztvertā) krāsa šķiet vairāk vai mazāk hromatiska. Tas ir arī pazīstams kā krāsainība (*Канаева & Болотова, 2018*).

Piesātinājums ir vizuālās sajūtas atribūts, kas ļauj spriest par to, cik lielā mērā hromatiskais stimulš atšķiras no tāda paša spilgtuma ahromatiskā stimula. Piesātinājums ir vizuālās sajūtas atribūts, kas ļauj spriest par to, cik lielā mērā hromatiskais stimulš atšķiras no ahromatiskā stimula neatkarīgi no to spilgtuma (*Суровцев & Родин, 2020*).

1.2. Displeju veidi

Šķidro kristālu displejs (LCD) - plakans displejs, kura pamatā ir šķidrie kristāli. Pamatojoties uz doto displeja veidu tiek izgatavotas ierīces, piemēram, monitori un televizori (*Иванов & Одинец, 2014*).

Displejā, lai izveidot krāsaino attēlu, tiek ievadīts īpašs slānis, kas iekrāsots ar organiskām vai neorganiskām krāsvielām, vai ievada RGB/CMY tipa krāsu sajaušanas sistēmas, kuras nodrošina atbilstošo krāsojumu caur krāsu filtra elementu esošajai gaismai. Šādu ierīču trūkums ir zems spilgtums un nepietiekams krāsu piesātinājums, kā arī mazs skata leņķis (*Беляев, 1999*).



1.1.att. LCD displejs (*Колесников и др., 2012*)

Šķidro kristālu LCD displejam (skat. 1.1.att.) ir virknē un paralēli viens otram uzstādīts vertikāls filtrs – 1, caurspīdīgi elektrodi – 2, LCD molekula – 3, horizontālais filtrs – 5, aizsargstikls – 6, uz aizsargstikla uzklāta silīcija plēve (biezums ne vairāk kā 30 nanometri ar zemu atstarošanas koeficientu) – 7 (*Колесников и др., 2012*).

CCFL gaismas starotājs, tas sastāv no stikla caurules ar elektrodiem abos galos. Caurule satur inerti gāzi un nelielu daudzumu dzīvsudraba, kas izstaro ultravioleto starojumu, ja to stimulē pielietots lauks. Caurules iekšpusē ir pārklāta ar luminoforu maisījumu, kas ultravioletā starojuma ietekmē izgaismo tā, ka gaismas avota radītais spektrs ir balts, lai gan spektrā var būt spektrāli atšķirīgas joslas. Lai nodrošinātu vienmērīgu apgaismojumu, starp gaismas avotu un LCD ekrānu ir novietots difuzors. Ar gaismas diodēm ir iespējams izveidot daudz plašākas krāsu gammas, jo tiek izmantotas piesātinātās primārās krāsas (*Smit, 2008*).

ICC (*International Color Consortium*) ierīču profili – 1993.gadā starptautisko krāsu konsorciju dibināja 8 nozares līderi ar mērķi izstrādāt universālu krāsu pārvaldības sistēmu, kas ir neatkarīga no operētājsistēmām un programmām. ICC krāsu profils tika izveidots, lai notiktu krāsu informācijas pārraide starp platformām un ierīcēm, kas atbalsta ICC standarts (*Hoise-Bounar et al.*, 2014). Visās krāsu pārvaldības sistēmās, kuru pamatā ir ICC, satur četrus pamata komponentus:

- krāsu pārvaldības modulis, kas apstrādā profilā saglabātos datus un veic visus aprēķinus;
- profili, kas apraksta saistību starp konkrētiem signāliem, vadības ierīcēm un krāsām;
- vieta profilu 'iesiešanai', kas ļauj krāsai piešķirt nepārprotamas digitālas vērtības no krāsu telpām (no cilvēka uztveres viedokļa), nevis atkarībā no dažādu krāsas reproducēšanai izmantoto ierīču īpašībām;
- dažādi veidi, kā interpretēt ārpus gammas esošās krāsas, t.i. tās krāsas, kas atrodas sākotnējā krāsu telpā, bet kuras nevar fiziski reproducēt ar izvades ierīci (*Орлова*, 2019)

1.3. Krāsu sajaukšanas sistēmas RGB un CMYK

Krāsu sajaukšanas sistēma ir atkarīga no krāsas moduļa, eksistē aditīvā un subtraktīvā metode kā arī krāsu nosaka katras primārās krāsas daudzums. Aditīvā krāsu sajaukšanas metode ir primārā, to viegli attēlot uz vienādmalu trīsstūrī (skat. 1.2.att.) (*Кудря и др.*, 2015).



1.2.att. Aditīvā krāsu sajaukšanas metode (RGB) (*Чижов*, 2018).

Virsoņēs ir norādītas primārās krāsas (sarkans, zils, zaļš). Trīsstūra malās tiek norādītas optiskās sajaukšanas rezultātā izveidojušās krāsas (fuksīns, ciāns, dzeltens), primāro un sekundāro krāsu sajaukšanas rezultātā rodas balta krāsa (sarkans + ciāns; zils + dzeltens; fuksīns + zaļš). Aditīvo metodi izmanto monitoru kalibrēšanai. Krāsu attēls uz monitora ir balstīts uz RGB krāsu

telpas, kurš sastāv no zaļiem, ziliem un sarkaniem gaismas punktiem. Aditīvā krāsu sajaukšanas sistēma pieņem, ka visa krāsu palete sastāv no mirdzošiem punktiem, piemēram, RGB sistēmu uz papīra nav iespējams attēlot, jo balts papīrs balsts papīrs absorbē krāsas un nav mirdzošs (Кельгина, 2020).

Subtraktīvā metode (CMYK krāsu modelis) ir pretēja aditīvai un tā apraksta krāsu mijiedarbību. Krāsas modeļa pamatā ir primāro krāsu atņemšana no baltās krāsas.



1.3.att. Subtraktīva krāsu sajaukšanas metode (CMYK) (Чижов, 2018).

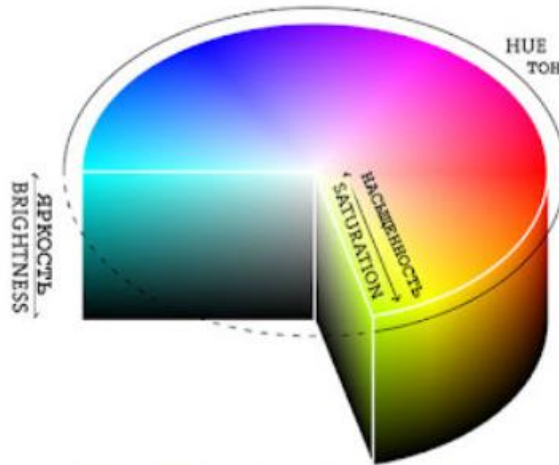
CMYK krāsas iegūst pārklājot gaiši zilo, dzelteni un citas krāsas, taču melno krāsu izmanto atsevišķi, jo tīro melno krāsu nav iespējams iegūt sajaucot primārās trīs krāsas (skat. 1.3.att.) (Скворцова, 2021). Subtraktīvās metodes piemērs: zilos fotonus absorbē dzeltens filtrs, tā dēļ tīklenē tiek uzbudināti acu vāļītes, kas ir jūtīgi pret sarkanām un zaļām krāsām (Кудря и др., 2015).

1.4. HSB un CIE Lab krāsu telpas.

HSB krāsu modelis – aditīvā krāsu sistēma, kur vērtības ir krāsu tonis, piesātinājums un spilgtums, nevis krāsas (Уланов, 2018).

- H (*Hue*) – vērtība, kura norāda uz krāsas pozīciju spektrā (piemēram, zaļā krāsa atrodas starp zilo un dzelteni).
- S (*Saturation*) – norāda uz krāsu toņa tīrību, tā svārstās no pelēkas līdz tīrai krāsai.
- B (*Brightness*) – krāsas spilgtuma skala no melnās līdz baltai, tiek mērīts procentos no 0 (nulles spilgtums -melns) līdz 100 % (Кельгина, 2020).

Krāsu nosaka vektoru virziens, savukārt piesātinājumu – vektora garums. Spilgtuma vērtību nosaka atsevišķa ass (skat. 1.4.att.).

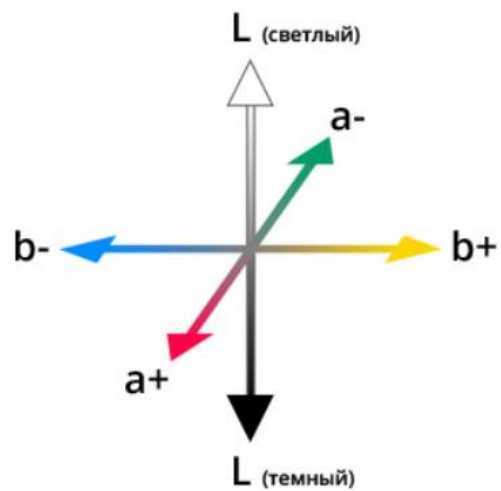


1.4. att. HSB krāsu sistēma (Максимов, 2019).

Eksistē arī HSL modelis, kurš līdzīgs HSB, galvenā atšķirība ir tas, ka spilgtuma vietā izmanto krāsas vieglumu (*Lightness*) (Уланов, 2018). Jo augtāks ir lightness iestātijums, jo gaišāka krāsa (100% - balta krāsa) bet jo zemāka, jo krāsa tumšāka (0% - melna krāsa). Jebkura HSB krāsa tiek iegūta, pievienojot galvenajam spektram melnu vai baltu krāsu, faktiski – pelēko krāsu. Krāsu apraksts nesakrīt ar acs uztvertajām krāsām (Тлеугабулова & Дёмин, 2015).

HSB un HSL modeļu trūkums ir tas, ka tie ir atkarīgi no ierīcēm un cilvēka acs nespēj uztvert atbilstošās krāsas, jo šie modeļi uztver krāsu ar atšķirīgu spožumu (piemēram, zilo cilvēka acs uztver kā tumšāku nekā sarkano), neskatoties uz to, ka šajā modelī visām krāsām ir vienāds spožums. Lai novērstu šo problēmu tika izveidota jauna Lab krāsu sistēma.

Lab krāsu sistēma tika izstrādāta, lai radītu paredzamo krāsas spektru. Šī sistēma ir neatkarīga no ierīcēm un sakrīt ar acs uztvertajām krāsām, faktiski piemērots cilvēka uztverei (Тлеугабулова & Дёмин, 2015). Lab modelis tika izstrādāts, lai novērstu CMYK, RGB un HSB nepilnības. Dotais modelis nav piesaistīts nevienai reproducējošai sistēmai un tai ir plaša krāsu gamma. Jebkuru raksturojamo krāsu nosaka divas hromatiskās koordinātes -a un b, kā arī viegluma vērtība L (*Lightness*) (skat. 1.5.att). Lab modelis vislabāk apraksta krāsu (Агеева и др., 2011).



1.5. att. Lab krāsu sajaušanas sistēma. L(светлый)- L(gaišs); L(темный)-L(tumšs) (Максимов, 2019).

2. METODE

2.1 Pētījuma apraksts

Pētījuma mērķis ir pārbaudīt un modificēt datoru monitoru krāsu kalibrēšanas algoritmu. Lai sasniegtu mērķi pētījums tika sadalīts 2 daļās. Pētījuma pirmās daļas mērķis bija noskaidrot un pārbaudīt esošo kalibrēšanas algoritmu uz NEC monitora. Pētījuma otrās daļas mērķis bija modificēt kalibrēšanas algoritmu un ierosināt labojumus datoru monitoru kalibrēšanai. Lai noteiktu vērtības, kuras primāri izstaro gaismu redzamās gaismas īso, vidējo un garo gaismas viļņu daļā, neieciešams izmantot radiospektrometru SpectraScan PR-655. Radiospektrometrs ir paredzēts spektrālo fotometrisko un kolorimetrisko gaismas mērījumu veikšanai, kur nepieciešami precīzi gaismas mērījumi no gaismas avotiem, piemēram, displeju monitoriem, projektoriem, atstarojošām virsmām un rūpnieciskām vajadzībām. Radiospektrometrs sastāv no:

- apgaismojuma daļas – sastāv no gaismas avota, diafragmas;
- spektrālās (optiskās) daļas – galvenie elementi ir kolimators, izkledējošā sistēma (difrakcijas režģis vai prizma), objektīvs un gaismas apertūra;
- Optiskā sprauga - svarīgs spektrālā instrumenta elements, kas nosaka tā veiktspēju, Tas vizualizē un pārraida starojumu, kas nonāk ierīces analizatorā. Tā ietekmē uz optisko izšķirtspēju, caurlaidspēju, gaismas diverģences leņķi;
- Difrakcijas režģis – sastāv no vienādu spraugu formas kopuma, kas atrodas vienādā attālumā viena no otras un tiek uzklātas uz necaurspīdīgā nesēja (nesējs var būt plakans vai ieliekts). Darbības princips ir balstīts uz gaismas difrakciju.

Darbības princips – optiskā sistēma safokusē gaismu uz difrakcijas režģa, kurš izvērst spektru. Difrakcijas aina tiek projicēta uz rindas sensoru (line sensor). Šis sensors nosaka ar kādu viļņu garumu gaisma tiek projicēta. Rezultāta ierīce dod informāciju par jaudas vērtību pie noteiktā viļņu garuma.

Mērījumus ir jāveic tumšā telpā, lai mazinātu neattiecināmās gaismas ietekmi. Mērījumi tika veikti 1 monitoram, izmantojot 5 dažādus ekspozīcijas laikus (1-5 sekundēm), lai saprastu pie kura ekspozīcijas laika tiek iegūti visprecīzākie rezultāti ar mazāko datu izkliedi. PowerPoint programmā tika izveidoti RGB krāsu kanāli. Katram krāsu kanālam bija 16 stimuli, to vērtība palielinājas no 0 līdz 255 ar soli 16 vienības. RGB krāsu sajaukšanas modelī ar 24 bitu krāsu dziļumu katram krāsu kanālam (sarkans, zāļš un zils) tiek iegūta 8 bitu sistēma. Katrai pamatkrāsai var būt $2^8 = 256$ vērtības (no 0 līdz 255), 0 – krāsas trūkums (melns), 255 – maksimālā krāsu klātbūtne (balts). Mērījumi katram stimulam tika veikti 5 reizes katram krāsu kanālam pie katra no spožuma līmeņiem, proti, $17 \cdot 3 \cdot 5 = 255$ mērījumi, kur 17- stimulu skaits, 3- krāsu knālu skaits, 5 - mērījumi katrā spožuma līmenī, tādējādi iegūstot precīzakus rezultātus.

Lai nodrošinātu korektus un atkārtojamus radiometriskos mērījumus, mērījumi tika veikti sekojošā veidā:

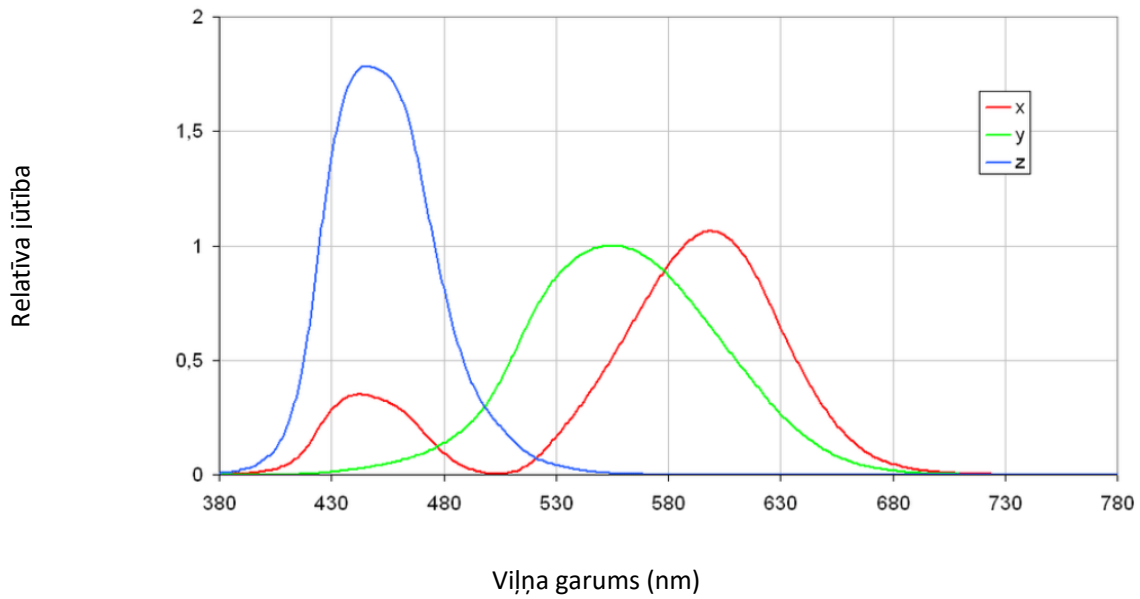
1. Mērierīci ir nepieciešams novietot uz statīva, lai marķieris neizkustētos un jānovieto perpendikulāri monitoram ar attālumu 1 metrs.
2. Jānoregulē mērierīces asums.
3. Jāveic mērijums nospīžot iekārta mērīšanas slēdzi, spožuma vērtība parādīsies uz mērierīces displeja.
4. Jānolasa mērierīces radījumi un jāapkopo rādītāji.

2.2 Kalibrēšanas metodika

CMF (saskaņošanas funkcija) – viens no svarīgākiem krāsu zinātnes un uztveres aspektiem, kas attēlo sarkanās, zaļās un zilās primārās gaismas daudzumu trīsstimulu vienībās. Šīs saskaņošanas funkcijas izmanto, lai kvantitatīvi noteikt stimula krāsu, kas tiek novērota noteiktā apstākļu kopumā, ņemot vērā psihofiziskos mainīgos lielumus – spilgtumu, viļņa garumu utt. (X,Y,Z trīsstimulu vērtības) (*Wyszecki&Stiles, 2000*). Krāsu saskaņošanas funkcijas ir katras primārās gaismas komponents – sarkano, zaļo un zilo krāsu vērtības, kuras ir nepieciešamas, lai cilvēks un dzīvnieku pasaule varētu uztvert visas redzamā spektrā krāsas. Šiem trim primārajiem komponentiem tika piešķirtas koordinātes X, Y, Z. Šīs XYZ sistēmas galvenais mērķis ir aprakstīt krāsu, ko cilvēks uztver tikai trīs pozitīvu vērtību veidā.

RGB krāsu saskaņošanas funkcijā pamatkrāsu izvēle ir saistīta ar cilvēka acs krāsu uztveres fizioloģijas īpatnībām un matematisma efektu – redzes pazīmi, kurā dažādā spektrālā sastāvā gaisma var izraisīt vienādas krāsu sajūtas.

Trīs parametru definēšanai var vienlīdz izmantot RGB un XYZ krāsu saskaņošanas funkcijas. Trīs-stimulu vērtībām eksistē gan pozitīvas, gan negatīvas vērtības. Viso viļņu garumu pozitīvo vērtību dēļ, priekšroka tiek dota XYZ krāsu saskaņošanas funkcijām (skat. 2.1.att).



2.1. att. XYZ saskaņošanas funkcija. (Wyszecki&Stiles, 2000).

Trīsdimensiju krāsu telpā CIE xyY jebkuru krāsas stimulu var aprakstīt ar trīs integrālsummām X, Y, Z. X,Y vai Z integrālsummās aprēķina ar atbilstošās krāsu saskaņošanas funkcijas reizinājums ar gaismas spektru (2.1):

(2.1)

$$X = \int I(\lambda) \times \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int I(\lambda) \times \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int I(\lambda) \times \bar{z}(\lambda) d\lambda,$$

kur $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ – CIE xyY krāsu telpas krāsu sajaukšanas funkcijas;
 $I\lambda$ – atstarotās vai izstarotās gaismas starojuma spektrs.

Lai iegūtu dažādus gaismas stimulus ir jāregulē spožumu atsevišķi katram no krāsu kanāliem. Pie katra no spožuma vērtībām R kanālam var aprakstīt ar trīs integrālsummām komplektu X, Y un Z. Kopējās stimulus integrālsummās ir atsevišķo krāsu kanāla atbilstoši integrālsummām kopējās vērtības (2.2).

(2.2)

$$\begin{aligned} X &= X_R + X_G + X_B \\ Y &= Y_R + Y_G + Y_B \\ Z &= Z_R + Z_G + Z_B, \end{aligned}$$

kur Y – spožums;

X – trīs CIE RGB līkņu maisījums, kuru vērtības kā pozitīvas;

Z – kvazikvantēts zilai krāsai (CIE RGB);

X_n, Y_n, Z_n – atsevišķo krāsu kanālu atbilstošās vērtības.

CIE xyY krāsu telpas tiek izveidotas tā, ka Y integrālsumma attēlo spožumu – tas ir reāls fizikāls fenomens, ko var nomērīt. Pamatojoties uz divām koordinātām x un y, tiek ieviesta plakana CIE hromatiskā diagramma, kas kopā ar spožumu Y ļauj atjaunot pārsātinātās XYZ krāsas. Trīsstūris xy ir izveidots tā, lai vienāds daudzums pārsātināto XYZ primāro krāsu kopums veidotu balto krāsu. Sistēma (x,y,Y) pakļaujas Grasmana likumiem:

1. krāsa ir trīsdimensiju – lai to aprakstīt ir nepieciešami trīs parametri. Jebkurai noteiktai krāsai var sastādīt tādu krāsu vienādojumu, kas izsaka krāsu lineāru atkarību;
2. ja trīs krāsu maisījumā viena no tām nepārtraukti mainās, bet pārējās divas paliek nemainīgas, tad nepārtraukti mainās arī maisījuma krāsa;
3. Maisījuma krāsa atkarīga tikai no sajaukto komponentu krāsām un nav atkarīga no to spektrālajiem sastāviem (*Малых & Челпанова, 2013*).

(2.3)

$$x = X/(X+Y+Z)$$

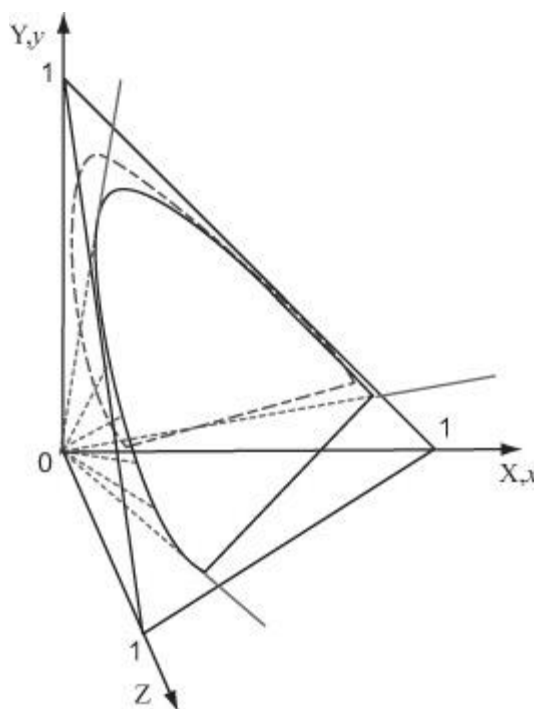
$$y = Y/(X+Y+Z)$$

$$z = Z/(X+Y+Z),$$

kur x, y, z – krāsu telpas XYZ koordinātu koeficienti;

X, Y, Z – krāsu telpas XYZ parametri.

Ja ievietot šos punktus trīsdimensiju eiklīda telpā, tad tie atradīsies uz plaknes $x+y+z = 1$ (skat. 2.2.att.).



2.2. att. Redzamo krāsu konuss 3D telpā CIE XYZ modelī.

Tomēr X , Y un Z vērtības nav iespējams iegūt zinot tikai x un y vērtības, jo tās neapraksta visas krāsu īpašības. Pilno krāsas aprakstu var iegūt izmantojot trīs vērtības: x, y un Y (spožums). Koordinātes x un y ir krāsu koordinātes, kuras kopā ar spožumu Y veido xyY CIE krāsu telpu. X integrālsomma, kura tiek dalīta uz atbilstošā krāsu stimula x koordinātes ir vienāda ar Y integrālsommu dalīto uz atbilstošā krāsu stimula y koordinātes. Izmantojot matemātiskās sakarības, iegūst, ka X integrālsomma vienāda ar spožuma (Y) reizinājumu uz atbilstošā krāsu stimula x koordinātes pret atbilstošā krāsu stimula y koordinātes. Z vērtība tiek iegūta tādā pašā veidā.

(2.4)

$$X/x = Y/y \rightarrow X = xY/y$$

$$Z = zY/y \rightarrow Z = (1-x-y)Y/y,$$

kur x, y, z – krāsu telpas XYZ koordinātu koeficienti;
 X, Y, Z – krāsu telpas XYZ parametri.

RGB ir aditīva un trīsdimensiju krāsu telpa, tāpat kā CIE XYZ. Tāpēc pārveidošanu starp šīm divām telpām apraksta ar 3×3 matricām. Ir jānorāda CIE XYZ sistēmā R, G un B pamatkrāsu koordinātes. Norādot krāsu informāciju par punktiem (x, y) un spožumu Y tiek izveidots jauns vienādojums (2.5), kurš tiks pārveidots matricu formā (2.6). Vienādojums tiek balstīts uz Grasmana pirmo likumu, kurš tika aprakstīts augstāk.

(2.5)

$$X = \frac{x_R Y_R}{y_R} + \frac{x_G Y_G}{y_G} + \frac{x_B Y_B}{y_B}$$

$$Y = Y_R + Y_G + Y_B$$

$$Z = \frac{(1-x_R-y_R)Y_R}{y_R} + \frac{(1-x_G-y_G)Y_G}{y_G} + \frac{(1-x_B-y_B)Y_B}{y_B},$$

kur x_n, y_n, z_n – atbilstošās krāsu telpas XYZ koordinātu koeficienti (kur $n = R, G$ vai B krāsu telpa);
 X, Y, Z – krāsu telpas XYZ parametri;
 X_n, Y_n, Z_n – atsevišķo krāsu kanālu atbilstošās vērtības (kur $n = R, G$ vai B krāsu telpa);

(2.6)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_R Y_R}{y_R} & \frac{x_G Y_G}{y_G} & \frac{x_B Y_B}{y_B} \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ \frac{(1-x_R-y_R)Y_R}{y_R} & \frac{(1-x_G-y_G)Y_G}{y_G} & \frac{(1-x_B-y_B)Y_B}{y_B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_R \\ Y_G \\ Y_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{(1-x_R-y_R)}{y_R} & \frac{(1-x_G-y_G)}{y_G} & \frac{(1-x_B-y_B)}{y_B} \end{bmatrix},$$

kur x_n, y_n, z_n – atbilstošās krāsu telpas XYZ koordinātu koeficienti;
 X, Y, Z – krāsu telpas XYZ parametri;
 X_n, Y_n, Z_n – atsevišķo krāsu kanālu atbilstošās vērtības.

Izmantojot augstāk minētas sakarības, tika samazināts nezināmo skaits no 9 līdz 3 (Y_R ; Y_G ; Y_B). Nākamais solis ir aprēķināt RGB kanāliem atbilstošākās Y_R ; Y_G ; Y_B vērtības. Lineāro vienādojumu var atrisināt piešķirot vērtības nezināmajiem, lai varētu pārbaudīt vienlīdzību. Labākais veids, lai atrisināt lineāru vienādojuma sistēmas ir ar Krāmera formulu palīdzību. Krāmera metodi var izmantot, lai atrisinātu sistēmu, kurā ir tik daudz lineāru vienādojumu, cik katrā vienādojumā ir nezināmo (*Крaмep*, 2019). Vērtības būs vienādas ar atbilstošās krāsu telpas determinantu pret kopējo krāsu telpas determinantu (2.7):

(2.7)

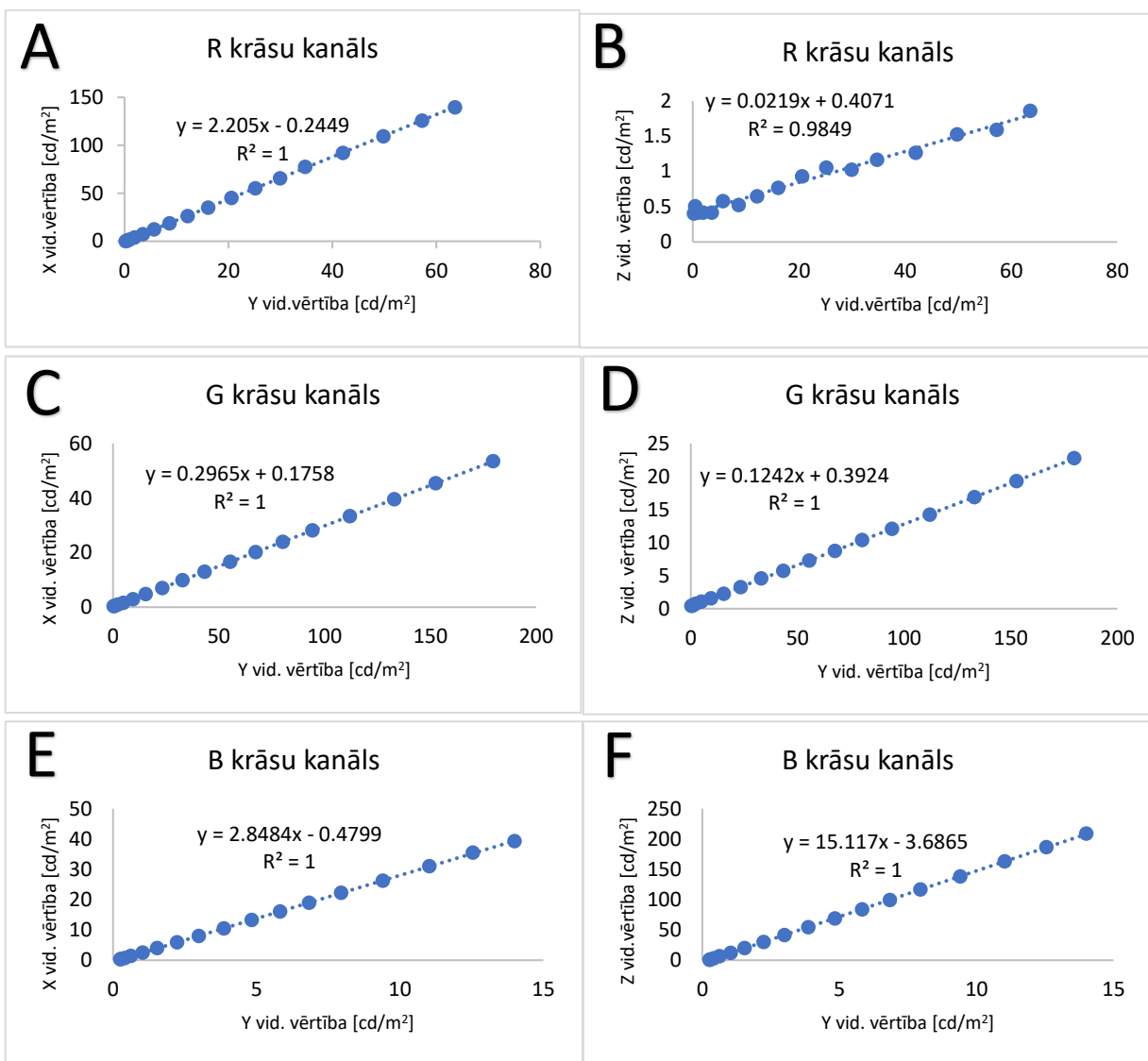
$$Y_R = \frac{\det \begin{bmatrix} X & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ Y & 1 & 1 \\ Z & \frac{(1-x_G-y_G)}{y_G} & \frac{(1-x_B-y_B)}{y_B} \end{bmatrix}}{\det \begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{(1-x_R-y_R)}{y_R} & \frac{(1-x_G-y_G)}{y_G} & \frac{(1-x_B-y_B)}{y_B} \end{bmatrix}},$$

$$Y_G = \frac{\det \begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} & X & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & Y & 1 \\ \frac{(1-x_R-y_R)}{y_R} & Z & \frac{(1-x_B-y_B)}{y_B} \end{bmatrix}}{\det \begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{(1-x_R-y_R)}{y_R} & \frac{(1-x_G-y_G)}{y_G} & \frac{(1-x_B-y_B)}{y_B} \end{bmatrix)},$$

$$Y_B = \frac{\det \begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & X \\ 1 & 1 & Y \\ \frac{(1-x_R-y_R)}{y_R} & \frac{(1-x_G-y_G)}{y_G} & Z \end{bmatrix}}{\det \begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{(1-x_R-y_R)}{y_R} & \frac{(1-x_G-y_G)}{y_G} & \frac{(1-x_B-y_B)}{y_B} \end{bmatrix}},$$

kur x_n, y_n, z_n – atbilstošās krāsu telpas XYZ koordinātu koeficienti;
 X, Y, Z – krāsu telpas XYZ parametri;
 X_n, Y_n, Z_n – atsevišķo krāsu kanālu atbilstošās vērtības.

Katra krāsu kanāla X un Z integrālsummām jāmainās proporcionāli attiecībā starp atbilstošā krāsu kanāla x un y krāsu koordinātēm, proti, ir jābūt tieši lineārai proporcijai. Veicot eksperimentu, tika noskaidrotas sakarības starp katra atsevišķo krāsu kanāla spožuma vērtībām un X, Z krāsu kanāla integrālsummām (skat. 2.3. att.). Kolerācija (R^2), kura redzama dotajā grafikā norāda uz atkarības pakāpi starp diviem mainīgiem (piem., X integrālsummas un spožuma vērtības). Kolerācijas koeficients pieņem vērtības no -1 līdz +1. Jo lielāka ir kolerācijas koeficienta vērtība, jo lielāka ir atkarība starp lielumiem. Grafikos (A-F) (skat.2.3.att.) kolerācija ir vienāda ar +1, no tā var secināt, ka ir tieša atkarība no mainīgiem lielumiem, t.sk., mainoties vienāi vērtībai proporcionāli mainīsies arī otra. Taču pati funkcija nav tieši proporcionāla, jo $y=ax+b$ (kur a - slīpuma koeficients, x – neatkarīgs mainīgais, b – brīvs koeficients), b vērtība nav vienāda 0. No tā var secināt, ka visos gadījumos funkcija neiet caur grafika nulles punktu.



2.3. att. A – X integrālsummas vērtība atkarībā no R krāsu kanāla spožuma. B – Z integrālsummas vērtība atkarībā no R krāsu kanāla spožuma. C – X integrālsummas vērtība atkarībā no G krāsu kanāla spožuma. D – Z integrālsummas vērtība atkarībā no G krāsu kanāla spožuma. E – X integrālsummas vērtība atkarībā no B krāsu kanāla spožuma. F – Z integrālsummas vērtība atkarībā no B krāsu kanāla spožuma.

Patreizējā algoritmā ir konstants lielums, kuru ir jāatņem vai jāpieskaita, lai korekti paredzēt atbilstošās integrālsummās vērtības atkarībā no dotā krāsu kanāla spožuma vērtībās. Tiek ierosināts izmantot nevis standarta modeli (algoritmu), kas paredz proporcionālo pieaugumu, bet precīzi noskaidrot lineārās sakarības starp katra krāsu kanāla X integrālsummām un spožuma vērtībām, Z integrālsummām un spožuma vērtībām un atbilstošā veidā to iekļaut vienādojumos, kas apraksta stimula X, Y un Z integrālsummā vērtības (2.8), (2.9).

(2.8)

$$\begin{aligned} X_r &= k_1 Y_r + b_1 \\ X_g &= k_2 Y_g + b_2 \\ X_b &= k_3 Y_b + b_3 \\ Z_r &= k_4 Y_r + b_4 \\ Z_g &= k_5 Y_g + b_5 \\ Z_b &= k_6 Y_b + b_6, \end{aligned}$$

kur k – slīpuma koeficients, kurš apraksta sakarību starp atbilstošām X vai Z integrālsummām un Y vērtību;
 b – brīvs koeficients.

(2.9)

$$\begin{aligned} X &= k_1 Y_r + b_1 + k_2 Y_g + b_2 + k_3 Y_b + b_3 = k_1 Y_r + k_2 Y_g + k_3 Y_b + b_1 + b_2 + b_3 \\ Y &= Y_r + Y_g + Y_b \\ Z &= k_4 Y_r + b_4 + k_5 Y_g + b_5 + k_6 Y_b + b_6 = k_4 Y_r + k_5 Y_g + k_6 Y_b + b_4 + b_5 + b_6, \end{aligned}$$

kur k – slīpuma koeficients, kurš apraksta sakarību starp atbilstošām X vai Z integrālsummām un Y vērtību;
 b – brīvs koeficients;
 X, Y – krāsu telpas XYZ parametri;
 X_n, Y_n, Z_n – atsevišķo krāsu kanālu atbilstošās vērtības.

Nākamais solis ir vienkāršot vienādujumu, kas apraksta X,Y un Z integrālsummu vērtības (2.10) un pārveidot to matricu formā (2.11):

(2.10)

$$X - (b_1 + b_2 + b_3) = k_1 Y_r + b_1 + k_2 Y_g + b_2 + k_3 Y_b + b_3 = k_1 Y_r + k_2 Y_g + k_3 Y_b$$

$$Y = Y_r + Y_g + Y_b$$

$$Z - (b_4 + b_5 + b_6) = k_4 Y_r + b_4 + k_5 Y_g + b_5 + k_6 Y_b + b_6 = k_4 Y_r + k_5 Y_g + k_6 Y_b$$

(2.11)

$$\begin{bmatrix} X - (b_1 + b_2 + b_3) \\ Y \\ Z - (b_4 + b_5 + b_6) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 Y_r & k_2 Y_g & k_3 Y_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ k_4 Y_r & k_5 Y_g & k_6 Y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_r \\ Y_g \\ Y_b \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} k_1 Y_r & k_2 Y_g & k_3 Y_b \\ 1 & 1 & 1 \\ k_4 Y_r & k_5 Y_g & k_6 Y_b \end{bmatrix},$$

- kur
- X, Y – krāsu telpas XYZ parametri;
 - X_n, Y_n, Z_n – atsevišķo krāsu kanālu atbilstošās vērtības;
 - k – slīpuma koeficients, kurš apraksta sakarību starp atbilstošām X vai Z integrālsummām un Y vērtību;
 - b – brīvs koeficients.

Rezultātā iegūst modeli, kur pirmā fāze ir tāda pati kā standarta krāsu kalibrācijas algoritmiem, proti, tiek ievadīti x,y,Y vērtības, aprēķinātas integrālsummas un tad tiek noskaidroti katra krāsu kanāla atbilstošākās spožuma vērtības, lai panāktu vēlamās stimula vērtības. Otrā fāzē ir jāizmanto jaunizveidoto algoritmu, ņemot vērā to, ka ja ir lineārās sakarības starp spožumu un X, Z integrālsummu vērtībām, tad tiek veiktas ierosinātas korekcijas. Nākamais solis ir noskaidrot atbilstošās spožuma vērtības, kādas tas būs RGB vērtībām.

(2.12)

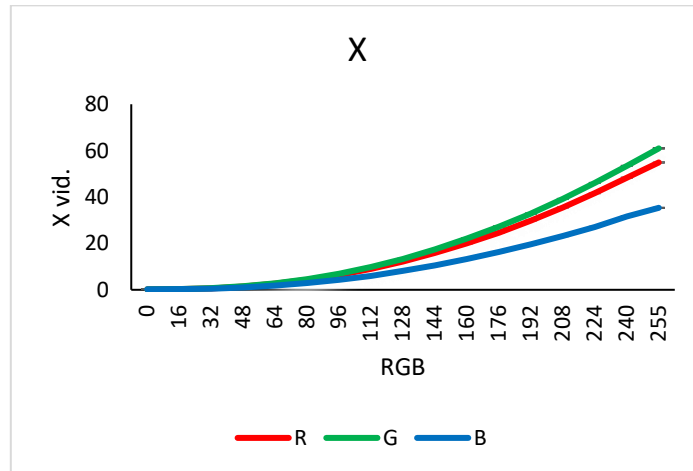
$$R = \frac{-b_R + \sqrt{(b_R)^2 - 4 * a_R * (c_R - Y_R)}}{2 * a_R};$$

$$G = \frac{-b_G + \sqrt{(b_G)^2 - 4 * a_G * (c_G - Y_G)}}{2 * a_G};$$

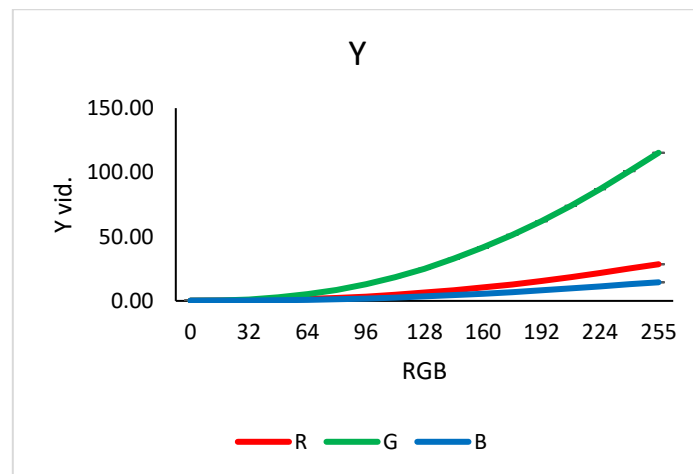
$$B = \frac{-b_B + \sqrt{(b_B)^2 - 4 * a_B * (c_B - Y_B)}}{2 * a_B};$$

3. REZULTĀTI

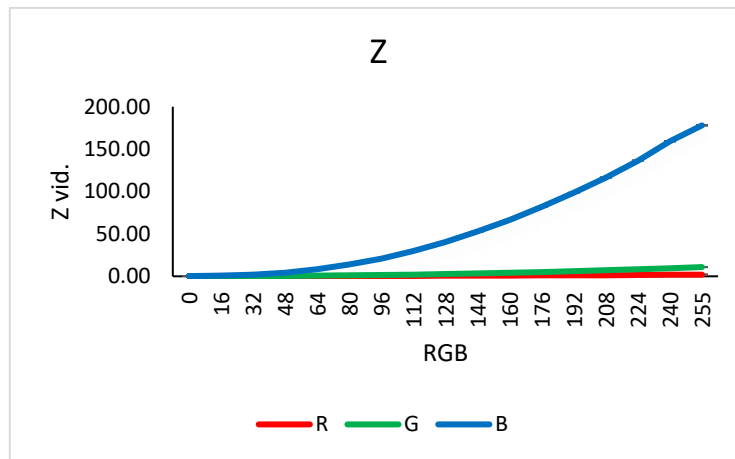
Pirmais solis bija noskaidrot pie kura ekspozīcijas laika tiek iegūti precīzāki dati ar mazāku izkliedi. Mērījumi tika veikti NEC monitoram ar spektroradiometru palīdzību. Katrs mērījums tika atkārtots 5 reizes un tad izrēķināta vidējā vērtība un standartnovirze, katram luminoforam pie katra krāsu kanāla. Tiek novērots, ka labākie rezultāti tiek iegūti pie ekspozīcijas laika piecas sekundes (skat. 3.1.att., 3.2.att., 3.3.att.), ņemot vērā augstāk minēto, pārējie mērījumi tiks veikti pie šī ekspozīcijas laika. Rezultātus pie ekspozīcijas laika no 1 līdz 4 sekundēm skatīt pielikumā Nr.1, Nr.2, Nr.3 un Nr.4.



3.1.att. X koordinātes attiecība pret krāsu kanāliem RGB

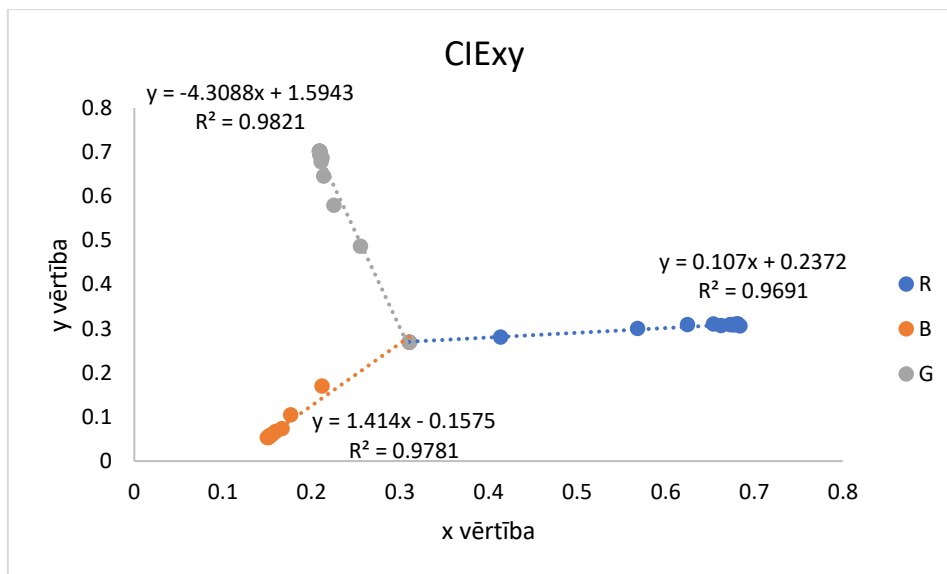


3.2.att. Y koordinātes attiecība pret krāsu kanāliem RGB.



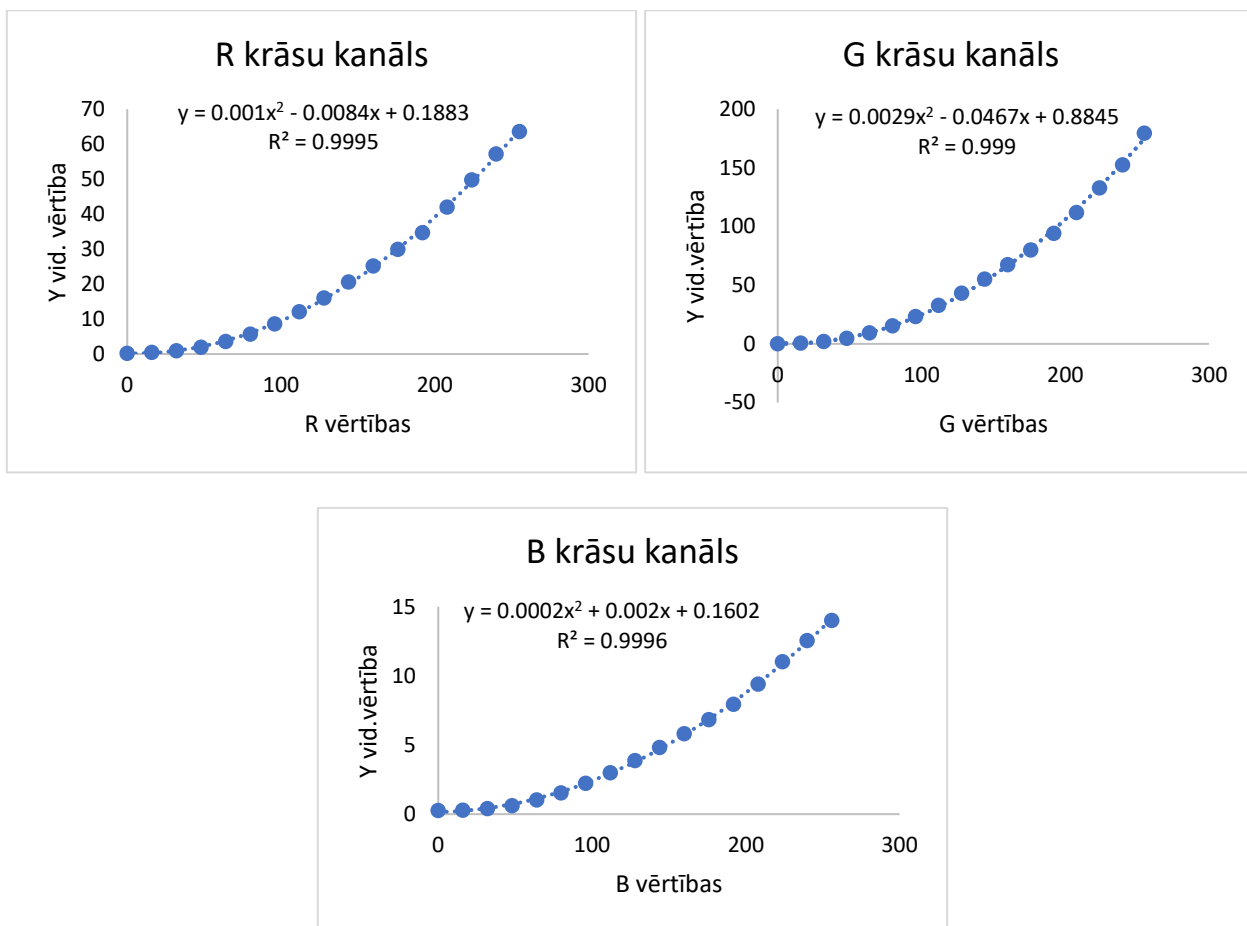
3.3.att. Z koordinātes attiecība pret krāsu kanāliem RGB.

Nākamais solis bija noskaidrot vai lineāri pieaug RGB vērtības palielinot spožumu. Analizējot iegūtos datus var secināt, ka x un y koordinātes visām krāsu telpām vērtības pieaug ar minimālo izkliedi (skat. 3.4.att). Kolerācija norāda uz to, ka mainoties vienam mainīgā mainās arī otrs. Dotajā gadījumā kolerācija matemātiski noapaļojot vienāda +1, no kā izriet, ka funkcija ir lineāra.



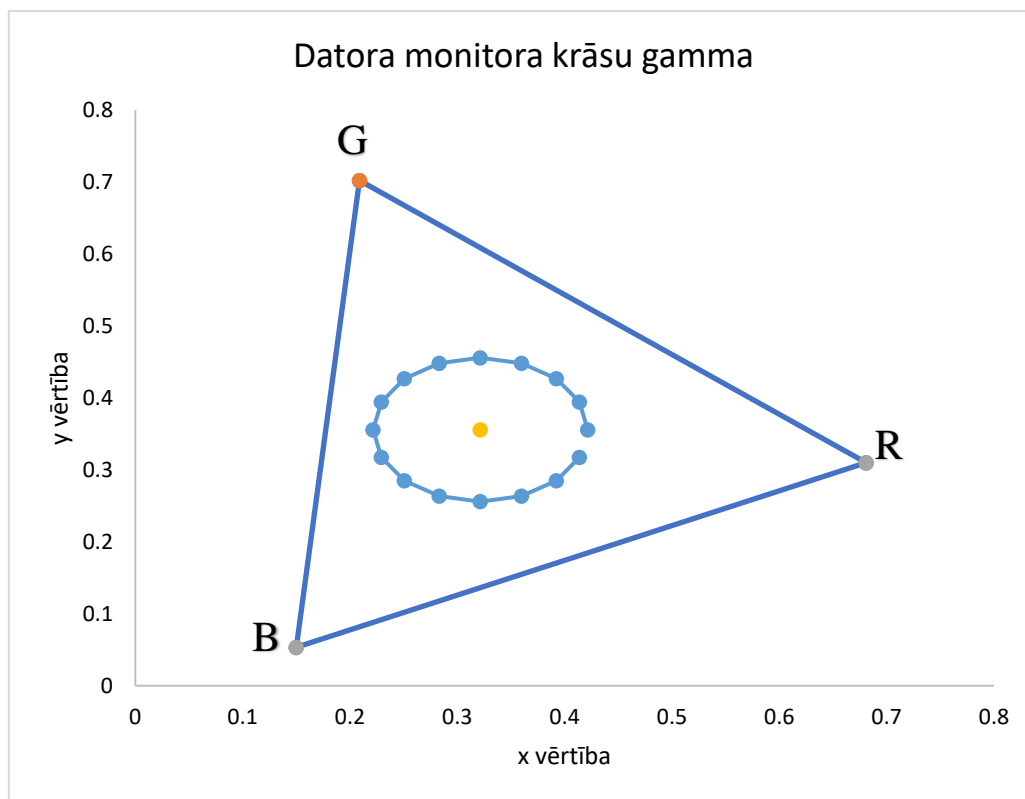
3.4.att. RGB krāsu kanālu vērtības pieaugot spožumam.

Tika ierosināts precīzi noskaidrot lineārās sakarības starp katra krāsu kanāla X integrālsummām un spožuma vērtībām, Z integrālsummām un spožuma vērtībām. To var aprakstīt ar otrās kārtas vienādojumu. Vienādojumi tika sastādīti zinot regresijas modeļu otrās kārtas koeficientu vērtības. Modificētā modelī (algoritmā) ir slīpuma koeficients, kurš apraksta sakarību starp atbilstošām X vai Z integrālsummām un Y vērtību un brīvs koeficients.



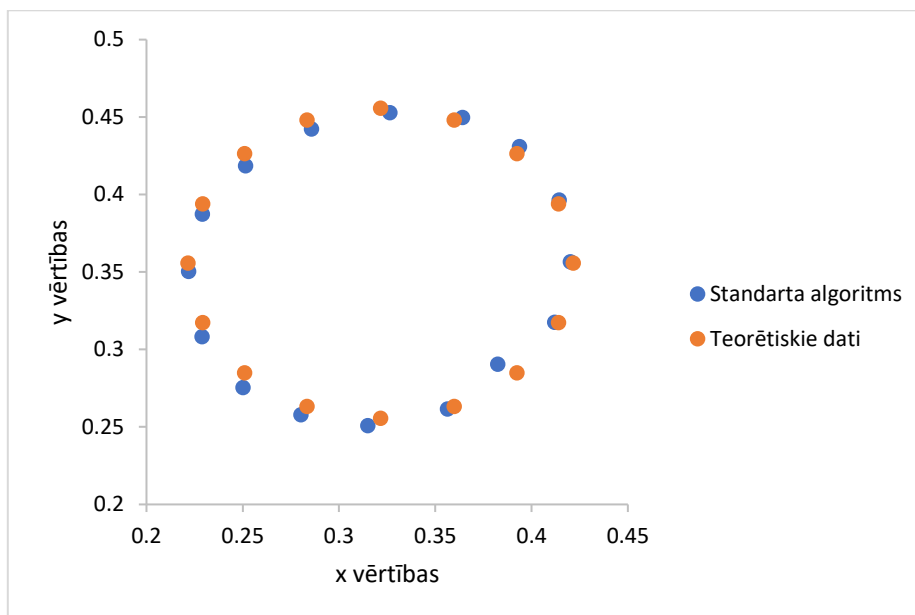
3.5.att. Lineārās sakarības starp katra krāsu kanāla X un Z integrālsummām un spožuma vērtībām.

Datora monitora krāsu gamma parāda kādas krāsas spēj attēlot monitors (skat.3.6. att.). Trīsstūris ir viso pieejamo stimulu skaits uz monitora, kurš tika izmantots eksperimentā un tā virsotnes ir x,y vērtības pie maksimālā atbilstošās krāsas spožuma. Krāsu skaits norāda uz cik gradācijām var sadalīt krāsu diapazonu, ko nosaka krāsu gamma. Jo lielāks krāsu stimulu skaits, jo vairāk toņi tiks parādīti displejā. Taču palielinot krāsu gammu, nepalielinot krāsu stimulu skaitu (bitu skaitu kanālā), tad uz gradientiem (vienmērīga pāreja no vienas krāsas uz citu) būs redzamas līnijas pārejas uz citu toni. Aplis, kurš atrodas trīsstūra iekšā norāda uz to, cik daudz krāsas (no visa datora monitora krāsu gammas) spēj uztvert cilvēka acs. Izvēlēts stimulu skaits ir 16, kuri tika izvietoti ik pēc $22,5^\circ$ Tika aprēķināts trīsstūrī ievilktais elipses centra punkts, kur $x_0 = 0,32154$, $y_0 = 0,35577$.

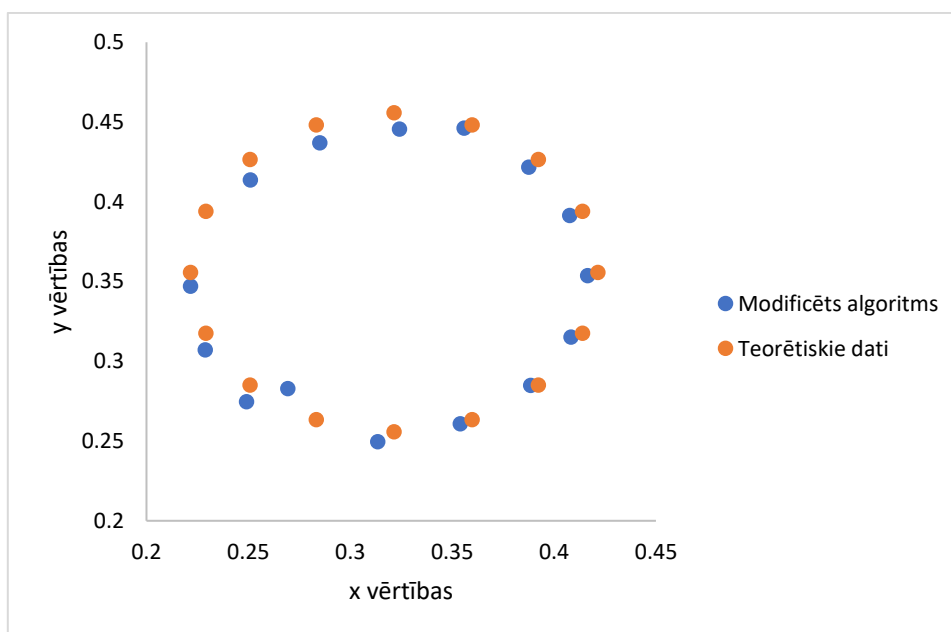


3.6.att. Datora monitora krāsu gamma, kur trīsstūris ir viso pieejamo stimulu skaits uz monitora. Aplis - cik daudz krāsu stimulu spēj uztvert cilvēka acs. R, G, B virsotnes - x,y vērtības pie maksimālā atbilstošās krāsas spožuma. Elipses punkts – balts pie maksimālā spožuma.

Nākamajā solī tika aprēķinātas teorētiskās, jeb vēlamās krāsu vērtības. Ievadot iegūtos datus standarta un modificētā algoritmā tika noskaidrotas kādas RGB koordinātes atbilst saskaņā ar teorētiskajām vērtībām. Tika izveidoti stimuli, kurus paredz atbilstošs modelis (algoritms) un veikta vēl viena mērījuma sessija. Iegūtie dati tika salīdzināti ar teorētiskajām vērtībām (skat. 3.7., 3.8. att.). Kā var redzēt neliela izkliede ir abiem modeļiem.



3.7.att. Salīdzinājums starp standarta modelim un vēlamajiem parametriem.



3.8.att. Salīdzinājums starp standarta modelim un vēlamajiem parametriem.

4. DISKUSIJA

Tiek minēts, ka datoru monitoru kalibrēšana ir aktuāla arī mūsdienās (*Duan et al.*, 2021). Piemēram, kad tiek veikti redzes uztveres pētījumi, t.i. krāsu redzes pārbaudīšana, ir jāzin kādus stimulus ir jāparāda, lai iegūtu korektus rezultātus. Stimulus raksturo ar CIE_{xy} krāsu sistēmu, kas tiek atkarīgs no divām krāsu koordinātēm un spožuma koordinātes. No tā var secināt, ka datoru monitora kalibrēšana optometrijā un redzes zinātne ir vajadzīga, lai korekti atainot krāsas. Ja displejs nebūs pareizi nokalibrēts, tad iegūtie dati eksperimenta laikā (piem., pārbaudot krāsu redzi) nebūs korekti.

Šī iemesla dēļ literatūrā tika apkopota informācija par krāsu kanāliem un monitora veidiem. Analizējot rakstus, tika noskaidrots, ka eksistē vairākas krāsu sajaukšanas sistēmas (RGB un CMYK, HSB un Lab), kā arī monitorā ir vairāki parametri, kurus var mainīt, t.sk. spožums, kontrasts, gamma, RGB vērtības utt., lai būtu iespēja piemērot ērtāko un labāko krāsu attainošanu uz monitora ekrāna. Šajā darbā tiek analizēta atkarība no spožuma vērtībām un X, Z integrāļsummām RGB krāsu sajaukšanas sistēmā.

Spožums ir viens no būtiskākajiem parametriem, kas ietekmē uz monitora kalibrēšanu un korektai krāsu attainošanai uz monitora. *Wachtel* (2014) savā publikācijā minēja par spilgtuma izmantošanu digitālajām reklāmām, taču šī nav tieša vērtība, bet subjektīva. Tāpēc šī darba ietvaros tiek ierosināts jautājums par monitoru kalibrēšanu atkarībā no spožuma, jo tas ir reāls fizikāls fenomens, ko var nomērīt.

Analizējot literatūrā minēto tika noskaidrots, ka patreizējais algoritms nav tik precīzs, jo tas paredz proporcionālo pieaugumu starp mainīgiem lielumiem, tā dēļ tika ierosināts precīzi noskaidrot lineārās sakarības starp katra krāsu kanāla X un Z integrāļsummām un spožuma vērtībām. Rezultātā tika iegūts, ka iegūtos datus fiziski nevar uzstādīt uz monitora displeja, jo iegūtie skaitļi nav apaļi, taču noapaļojot tos rodas datu kļūda, kura ietekmēs uz krāsu attainošanu uz monitora ekrāna. Lai novērstu šo problēmu var izmantot lielāku bitu sistēmu, lai datora monitora krāsu gamma būtu plašāka.

Kad tiek veikta sakotnēja datoru monitoru kalibrācija, tad katra krāsu kanāls tiek kalibrēts atsevišķi un tie kanāli, kuri netiek izmantoti attiecīgi procesā neiesaistās. Taču veicot mērījumus tiek izmantoti visi trīs krāsu kanāli. Var secināt, ka daļēji nokļīst gaisma no blakus krāsu kanāliem, tādējādi ietekmē gala rezultātus. Tālākais mērķis būtu noskaidrot kā mateimātiski var novērst doto problēmu.

SECINĀJUMI

1. Veicot mērījumus ar spektrometra palīdzību pie dažādiem ekspozīcijas laikiem, tika noskaidrots, ka dati ar mazāko izkliedi ir pie ekspozīcijas laika piecas sekundes. No tā var secināt, ka visus tālākos mērījumus ir jāveic pie šī ekspozīcijas laika.
2. Neviens no modeļiem (standarta un modificēts) nenodrošina ideālu rezultātu, kā arī neviens no algoritmiem neuzrāda ka viens būtu labāks par otru.

PATEICĪBA

Vēlos izteikt vislielāko pateicību darba vadītājam Renāram Trukšam par dotajiem padomiem un ieteikumiem, sniegtu informāciju un atbalstu bakalaura darba rakstīšanas laikā!

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

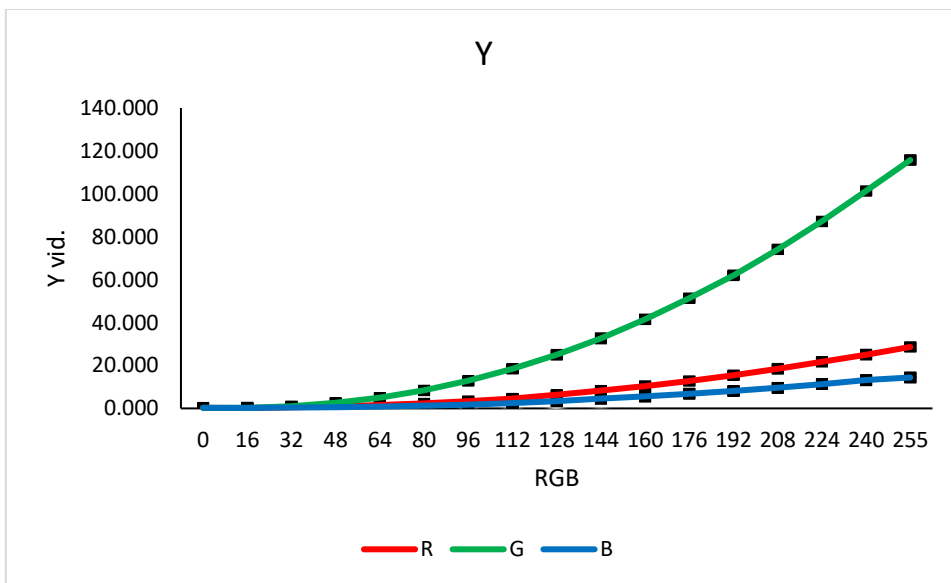
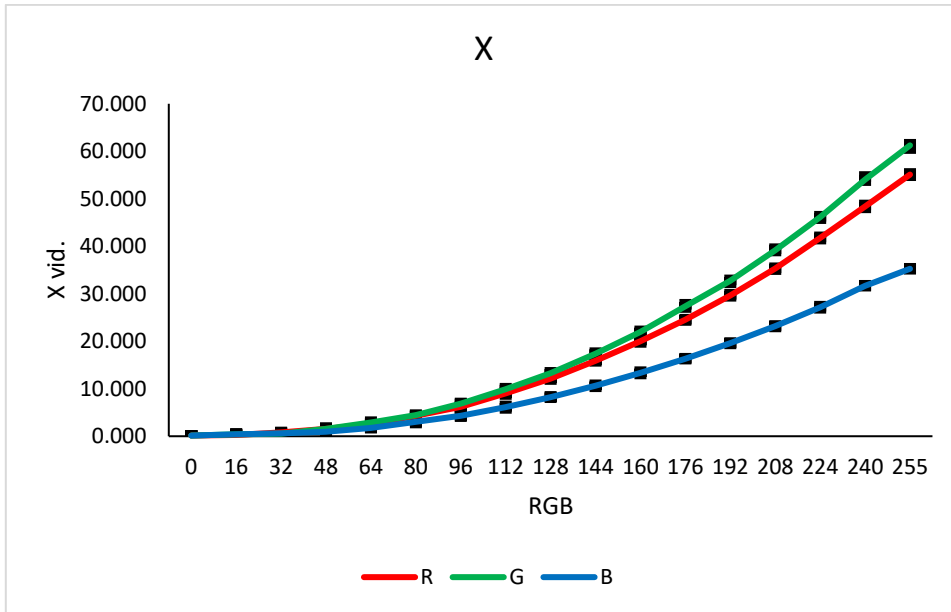
- Duan, N., Chen, X., Rao, M., Zhou, C., & Wang, Z. (2021). *Clinical Radiology*. The Royal College of Radiologists.
- Fan, J., Roehrig, H., Dallas, W., & Krupinski, E. (2009). Medical color displays and their calibration. *Proceeding of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. Pieejams:<https://www.researchgate.net/publication/252765668> Medical color displays and their calibration (skatīts: 8.10.2020).
- He, Y., Zhang, X., Quan, L., Mi, R., Cui, Y., Xu, J., & Tian Z. (2021). Influence of coloured light projected from night-time excessive luminance outdoor LED display screens on vehicle driving safety along urban roads, *Building and Environment*. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107448> (skatīts: 2.10.2020).
- Shepherd, A., (1997). Calibrating screen for continuous colour displays. *Spatial Vision*. 11(1), 57-74.
- Smit, A. (2008). Светодиодная подсветка ЖК- дисплеев. Шоп-микросхема регулятора напряжения. *Электроника: наука, технология, бизнес*, 4(86), 23-25.
- Wachtel, J. (2009). Safety Impacts of the Emerging Digital Display Technology for Outdoor Advertising Signs. Final report. NCHRP Project 20-7 (256). Pieejams: https://transops.s3.amazonaws.com/uploaded_files/Safety%20Impacts%20of%20the%20Emerging%20Digital%20Display%20Technology%20for%20Outdoor%20Advertising%20Signs.pdf (skatīts 18.02.2022).
- Zhang, H., Lizann, A., Iemmi, C., Monroy-Ramirez, A., Marquez, A., Moreno, I., Campos, J. (2018). LCoS display phase self-calibration method based on diffractive lens schemes, *Optics and Lasers in Engineering*. 108(1), 147-154.
- Zhang, Z., Liu, J., Gao, Q., Duan, X., & Shi, X. (2019). A full-color compact 3D see-through near-eye display system based on complex amplitude modulation. *Optics express*. 27(5), 7023–7035.

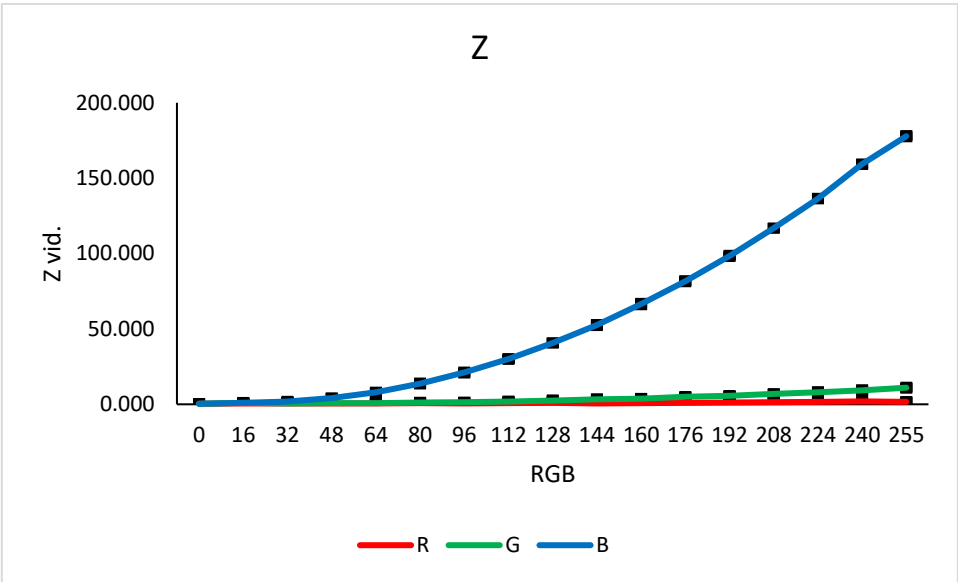
- Беляев, С.В., Бобров, А., & Лазарев, П.И. (1999). Жидкокристаллический дисплей. (RUS Patents Nr. RU 2139559 C1) Pieejams: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38135276> (skatīts 11.01.2022)
- Иванов, Д.И., Одинец, А.И., (2014). Жидкокристаллический дисплей. Наука, образование, бизнес, 286-288. Pieejams: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25703459> (skatīts: 08.01.2022).
- Канаева, И.А., & Болотова, Й.А. (2018). Методы коррекции цвета и яркость при создании панорамных изображений. *Компьютерная оптика*. 5(42), 885-897.
- Колесников, В.А., Сюмаченко, Т.А., Кузин, Н.Н., & Василенко, И.И. (2012). Жидкокристаллический дисплей. (RUS Patents Nr. RU 120249 U1) Pieejams: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38407196> (skatīts 11.01.2022)
- Крамер, Г. (2019). *Математические методы статистики*. Регулярная и хаотическая динамика.
- Максимов, А. (June 3, 2019). Цветовые модели. *Первое знакомство с Adobe Photoskop*. Pieejams: https://maximov2019.blogspot.com/2019/03/blog-posy_90.html (skatīts 1.29.2022).
- Малых, А.Е., & Челпанова, Ю.Н. (2013). Герман Грассман и его учение о протяженности. Pieejams: <https://cyberleninka.ru/article/n/german-grassman-i-ego-uchenie-o-protyazhennosti/viewer> (skatīts 27.05.2022).
- Орлова, Д.А., (2019). Международный консорциум по цвету: цели и назначения. *Общественные науки: Информатика*. Pieejams: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/238308> (skatīts 15.01.2022)
- Суровцев, В.А., & Родин, К.А. (2020). “Заметки о цвете” Людвига Витгенштейна: от логики цвета – к социологии цвета. *Праксема. Проблемы визуальной семиотики*. 2(24), 25-28.
- Тлеогабулова, З.К., & Дёмин, А.Й. (2015). Разработка библиотеки для работы с цветовыми моделями. Pieejams: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/23857> (skatīts 15.01.2022).

Чижов, С.А., (2018). Управление цветом в широкоформатной печати: RGB VS CMYK.
Science time, 57(9), 43-47.

1. PIELIKUMS

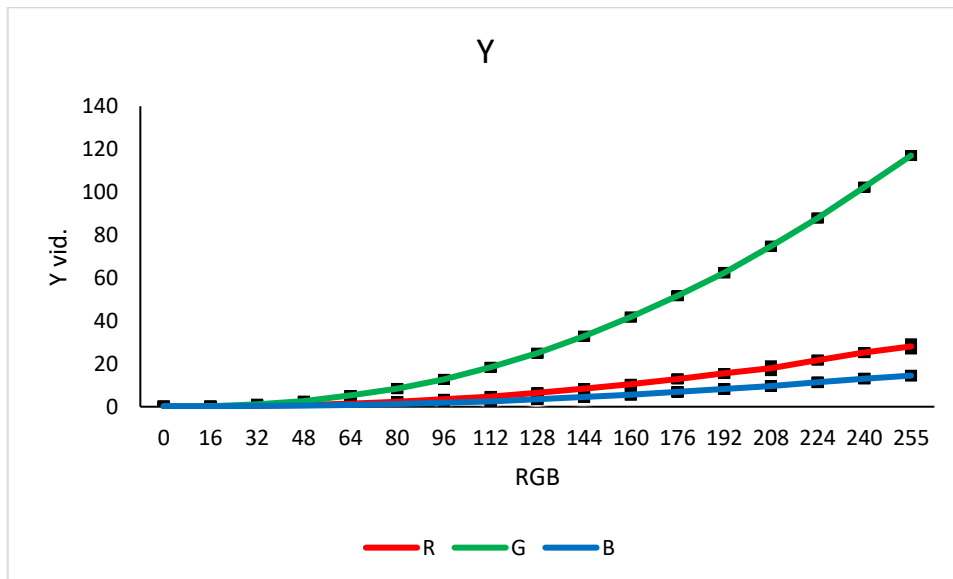
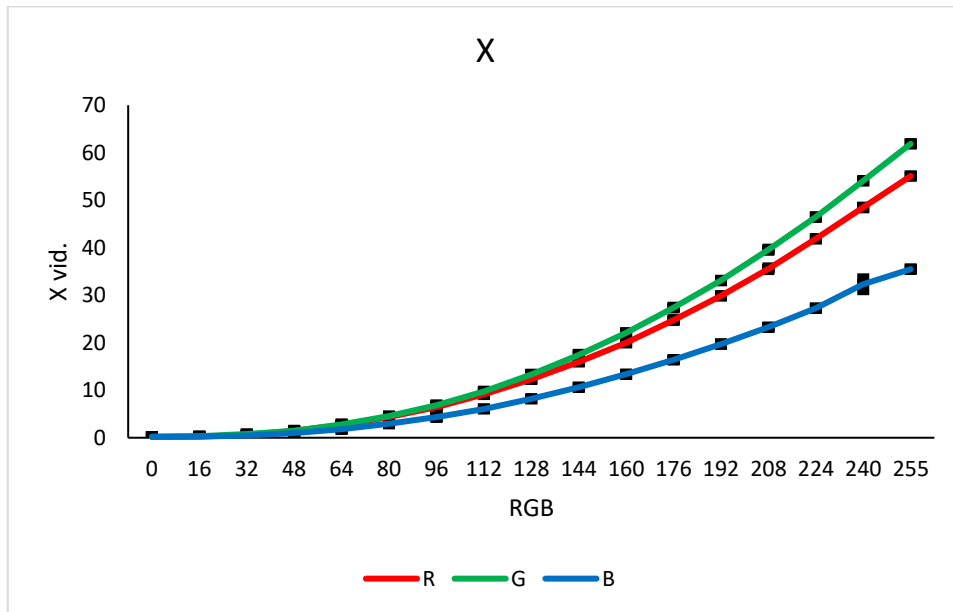
Šajā pielikumā ir attēlotas X, Y, Z koordinātes attiecība pret krāsu RGB kanāliem. Mērījumi tika veikti pie ekspozīcijas laika viena sekunde.

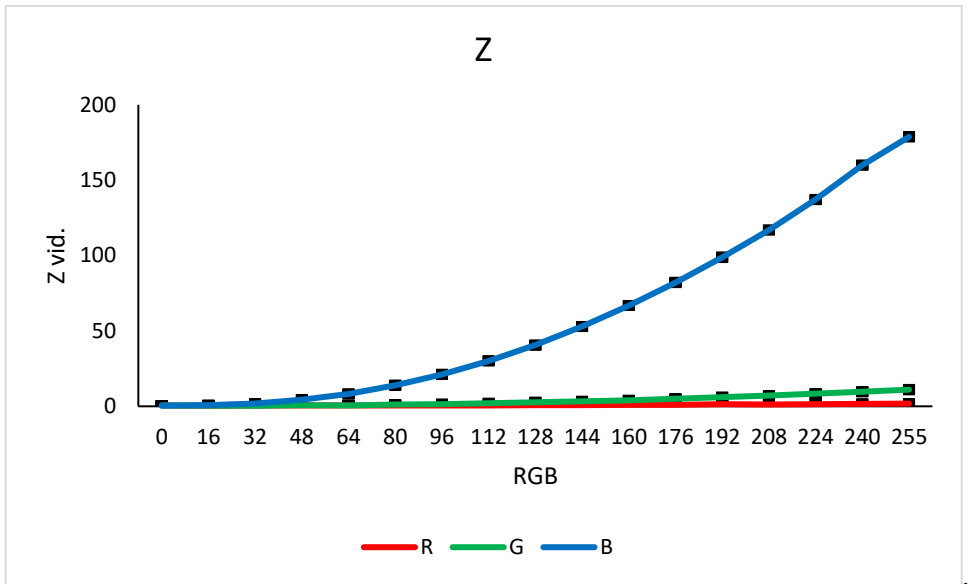




2. PIELIKUMS

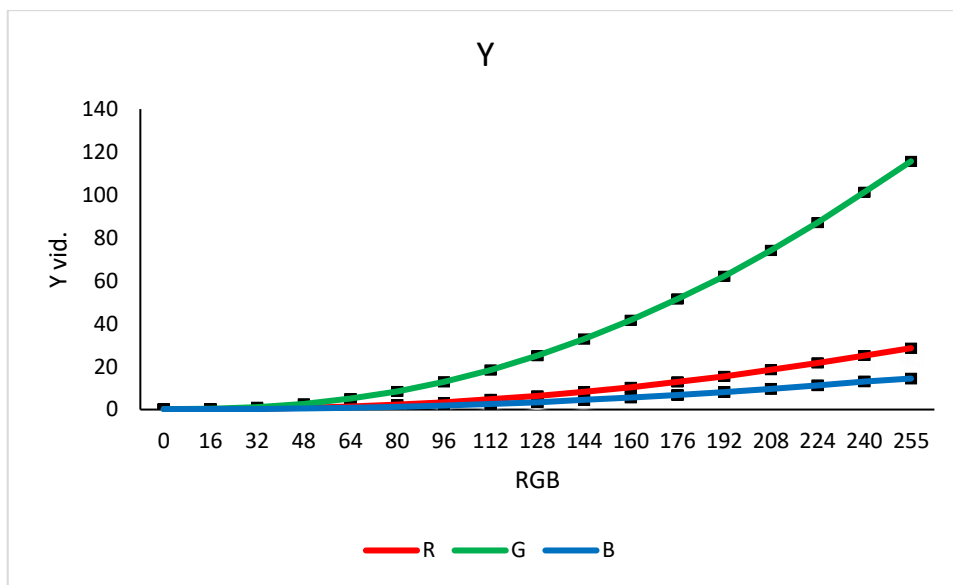
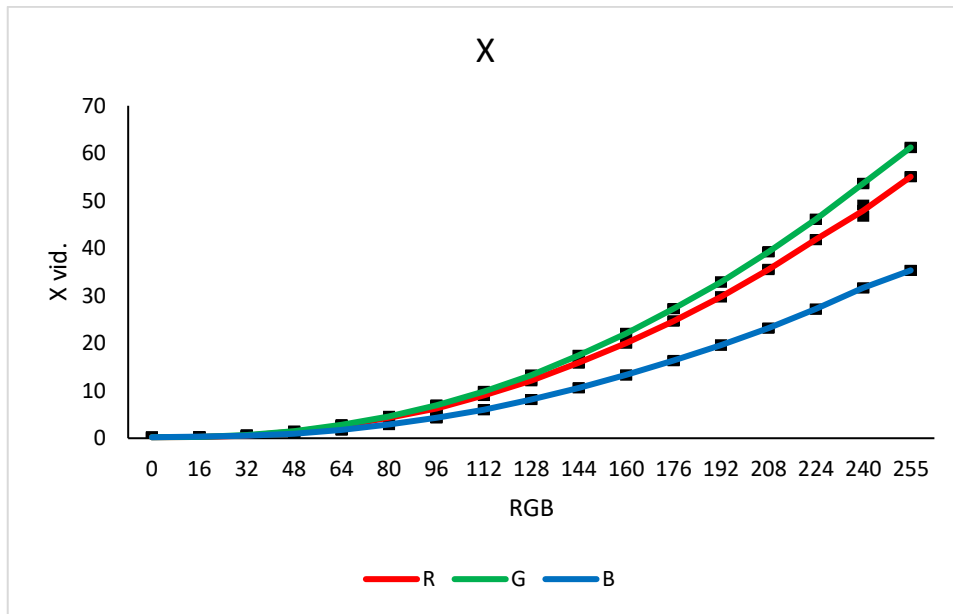
Šajā pielikumā ir attēlotas X, Y, Z koordinātes attiecība pret krāsu RGB kanāliem. Mērījumi tika veikti pie ekspozīcijas laika divas sekundes.

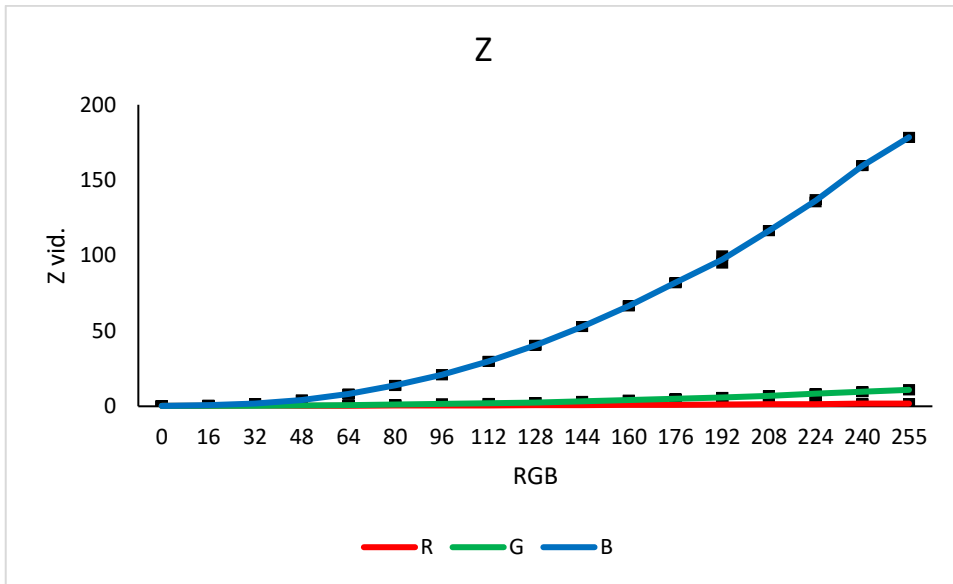




3. PIELIKUMS

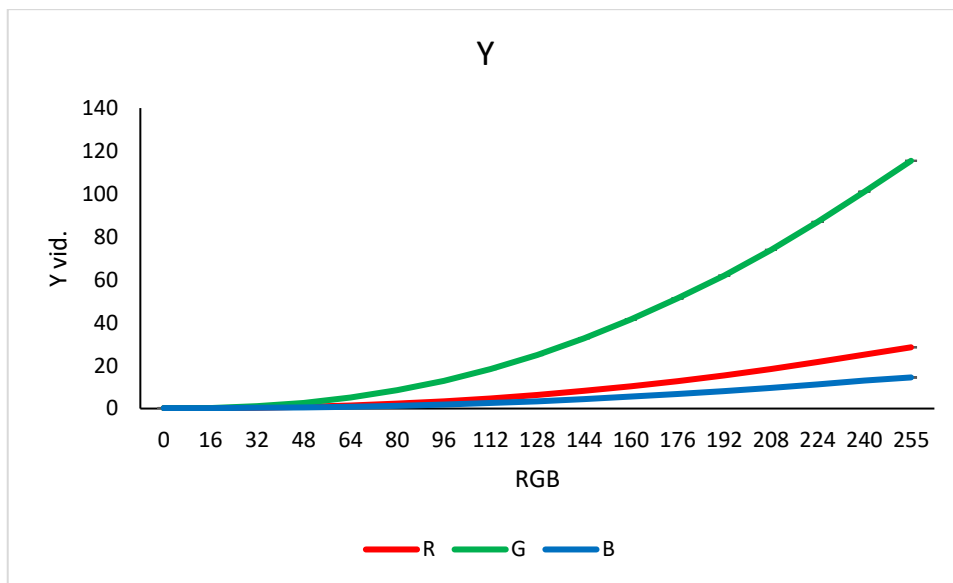
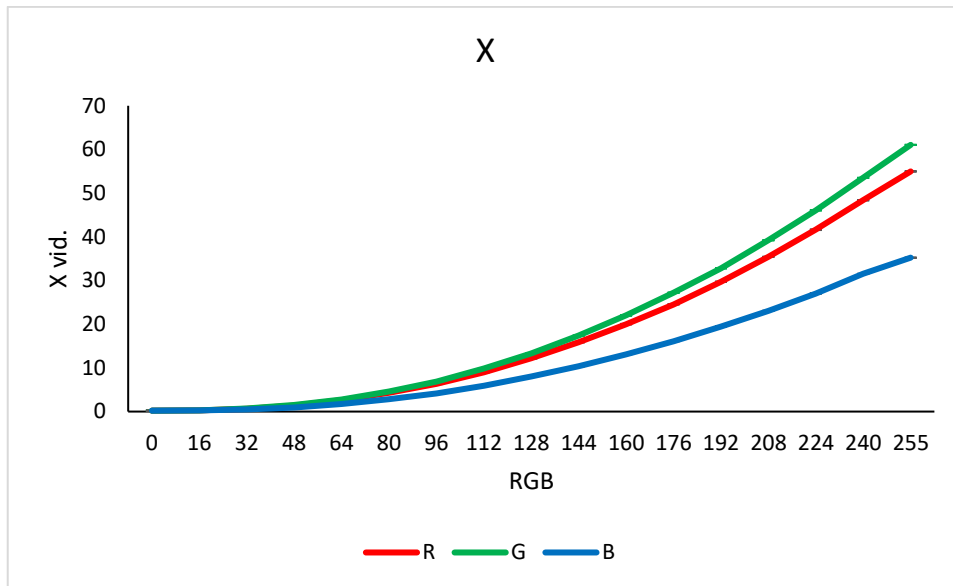
Šajā pielikumā ir attēlotas X, Y, Z koordinātes attiecība pret krāsu RGB kanāliem. Mērījumi tika veikti pie ekspozīcijas laika trīs sekundes.

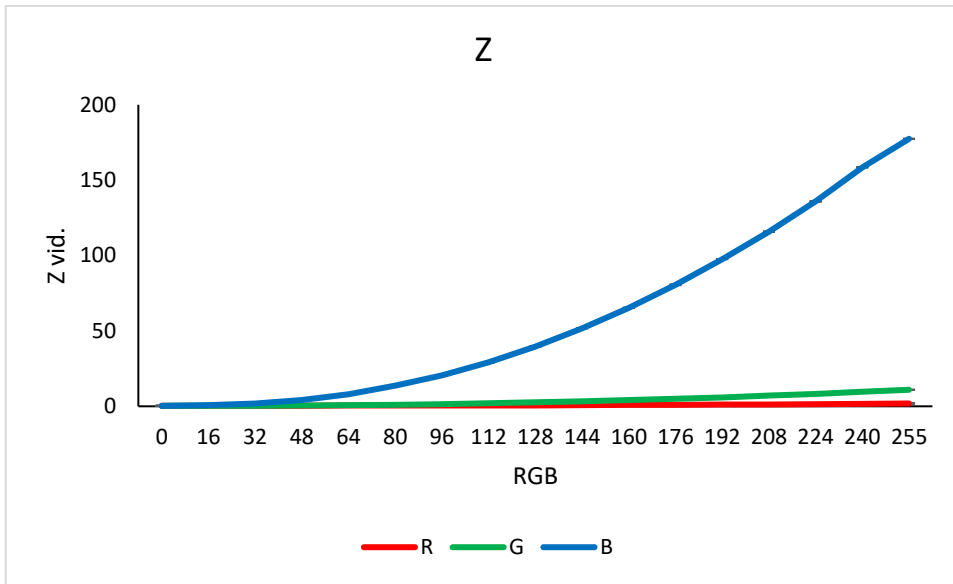




4. PIELIKUMS

Šajā pielikumā ir attēlotas X, Y, Z koordinātes attiecība pret krāsu RGB kanāliem. Mērījumi tika veikti pie ekspozīcijas laika četras sekundes.





Bakalaura darbs „ KRĀSU KALIBRĒŠANAS ALGORITMU IZSTRĀDE ” izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autors: _____ Anastasija Kalačikova
(paraksts)

Rekomendēju/nerekomendēju bakalaura darbu aizstāvēšanai

Vadītājs: lektors prof.mag. Renārs Trukša _____
(paraksts) (datums)

Recenzents: profesors Dr.phys. Māris Ozoliņš

Darbs iesniegts Optometrijas un redzes zinātnes nodaļā _____.

Dekāna pilnvarotā persona: metodiķe Inita Šneidere _____
(paraksts)

Darbs aizstāvēts Bakalaura gala pārbaudījuma komisijas sēdē

_____.202_. protokola Nr. _____ Komisijas sekretārs:

(paraksts)